UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

FACULTAD DE INGENIERÍA

Fingxels

Algoritmo de iluminación global basado en el uso de vóxeles

Informe de Proyecto de Grado presentado por

Francisco Aguirre, Felipe Pizzorno

en cumplimiento parcial de los requerimientos para la graduación de la carrera de Ingeniería en Computación de Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República

Supervisor

Eduardo Fernández

Montevideo, 2 de diciembre de 2024

Fingxels

Algoritmo de iluminación global basado en el uso de vóxeles por Francisco Aguirre, Felipe Pizzorno tiene licencia CC Atribución 4.0.

Agradecimientos

Gracias a nuestras parejas, familias y amigos, quienes nos brindaron su apoyo durante las largas noches dedicadas a este proyecto. Su paciencia, comprensión y ánimo fueron fundamentales para que este trabajo se concluyera.

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de la iluminación global en tiempo real, un problema desafiante y relevante en la industria de los videojuegos, cine, simulaciones y la computación gráfica en general. La mayoría de las técnicas de iluminación global se basan en el método de Monte Carlo. Esto las hace computacionalmente costosas, requiriendo hardware especializado y técnicas de aprendizaje automático para alcanzar el tiempo real.

En este contexto, se hace foco en el algoritmo de *voxel cone tracing*, una técnica de trazado de conos que usa una estructura de datos basada en vóxeles. Esta técnica se ha mostrado prometedora por su capacidad para producir efectos de iluminación global de alta calidad en tiempo real sin necesidad de hardware especializado.

El objetivo principal de este trabajo es crear una implementación open source del algoritmo de *voxel cone tracing* y probarla en hardware moderno. La implementación realizada, no solo demuestra la viabilidad y eficacia de la técnica en un entorno de hardware actual, sino que también es un recurso didáctico valioso para cualquier persona interesada en aprender acerca de computación gráfica, iluminación global y su implementación.

Para la implementación, se utilizaron principalmente las herramientas Rust y OpenGL, debido a su alto rendimiento, abundancia de documentación y simplicidad. El algoritmo corre mayoritariamente en la GPU para aprovechar la alta paralelización que esta provee. Se desarrolló en Linux, pero el programa no está limitado a este sistema operativo y puede ser portado fácilmente a otros.

Para la evaluación, se realizaron experimentos en distintos equipos y con distintas escenas.

El código del motor se encuentra en el siguiente repositorio:
https://github.com/franciscoaguirre/voxel-cone-tracing

Palabras clave: Voxel cone tracing, Iluminación global, OpenGL, Rust

Índice general

1. Introducción **1**

1.1. Organización del documento 2

2. Revisión de antecedentes **3**

2.1. ¿Qué es la luz? 3

2.2. Radiometría: Unidades de la luz 5

2.3. Iluminación local e iluminación global 7

2.3.1. Iluminación local 8

2.3.2. Iluminación global 9

2.4. BRDF 10

2.5. Trazado de rayos (*ray tracing*) 11

2.6. Trazado de conos 13

2.7. Photon Mapping 14

2.8. Vóxeles 16

2.9. Octrees 17

2.10. Ducto gráfico 18

3. Voxel cone tracing **21**

3.1. Voxelización 22

3.1.1. Rasterización conservativa 25

3.2. *Octree* disperso 25

3.2.1. Nodos, bricks y vóxeles 26

3.2.2. Construcción 27

3.2.3. Border transfer 30

3.2.4. Nodos frontera 31

3.2.5. Filtrado 34

3.2.6. Filtrado anisotrópico 37

3.3. Inyección de fotones 39

3.4. *Cone tracing* . . . 39
3.5. Oclusión ambiental . . . 41
3.6. Conos de sombra . . . 42

4. Implementación **43**
4.1. *Engine* . . . 44
4.2. Core . . . 46
4.2.1. Etapas del algoritmo . . . 47
4.2.2. Representación del *octree* . . . 47
4.2.3. Renderizado diferido . . . 51
4.2.4. Menú . . . 52
4.3. CLI . . . 52
4.3.1. Archivo de configuración . . . 53
4.3.2. Archivos de escena . . . 53
4.3.3. Archivos de valores predeterminados . . . 53
4.4. Limitaciones . . . 54

5. Experimentación **57**
5.1. Análisis de resultados . . . 59

6. Conclusiones y Trabajo Futuro **61**
6.1. Principales conclusiones . . . 61
6.2. Trabajo futuro . . . 62

Anexo: Manual de Usuario **65**
.0.1. Compilación del Código Fuente . . . 65
.1. Opciones de Ejecución . . . 65
.2. Controles del Programa . . . 66
.2.1. Acceso al Menú . . . 66

Capítulo 1

Introducción

El libro "Real-Time Rendering" [Ake+18, p. 1] presenta una buena introducción al renderizado en tiempo real. Este se ocupa de generar imágenes rápidamente en la computadora. Una imagen aparece en la pantalla, el espectador actúa o reacciona y esta retroalimentación afecta lo que se genera a continuación. La velocidad a la que se muestran las imágenes se mide en cuadros por segundo (FPS) o hercios (Hz). Aproximadamente a 6 FPS, comienza a surgir una sensación de interactividad. Los videojuegos apuntan a 30, 60, 72 o más FPS; a estas velocidades, el usuario se enfoca en la acción y la reacción.

Una forma de proveer realismo a estas imágenes es mediante iluminación global [Ake+18, p. 437]. Esta es compleja de lograr en tiempo real. Para eso, se requiere una mezcla de hardware y arquitectura de software adecuados.

La iluminación global en tiempo real ha sido objeto de estudio desde la década de los 70 y continúa siendo uno de los desafíos fundamentales de la computación gráfica. Tiene una alta importancia en varias industrias, como la de los videojuegos, la del cine, las simulaciones físicas, entre otros.

Existen varios métodos para resolver el problema de la iluminación global. La mayoría de ellos se basan en el trazado de rayos [Whi80], que consiste en trazar rayos desde la cámara hacia la escena y simular los caminos que recorren los fotones. Sin embargo, su alto costo computacional ha limitado históricamente su uso en tiempo real.

A lo largo de los años, se han desarrollado numerosas optimizaciones para reducir este costo. Estas incluyen simplificaciones en la geometría [Cra+09], el uso de estructuras jerárquicas [SA19], *clustering* [Wan+09], entre otras. A pesar de estos avances, el problema continúa siendo un área activa de investigación.

Métodos recientes utilizan hardware especializado para alcanzar tiempos in-

teractivos. Además, se han logrado importantes avances en el uso de la inteligencia artificial (IA), empleada para realizar los cálculos en una menor resolución y escalarla a la resolución objetivo [WCH20], ahorrando costos.

El trabajo presente se centra en *voxel cone tracing* [Cra+11], un algoritmo de iluminación global que funciona en tiempo real sin necesidad de hardware específico. El objetivo del trabajo es aprender sobre este algoritmo y crear una implementación open source del mismo. El algoritmo fue propuesto por Crassin et al en 2011 [Cra+11], cuando no existían muchas soluciones para el problema de iluminación global en tiempo real y la demanda estaba creciendo debido a la importancia de la industria de los videojuegos.

Se basa en una representación de vóxeles [Ake+18, p. 578] de la geometría, el trazado de conos [Ama84] y el uso de estructuras jerárquicas de datos y prefiltrado para reducir los cálculos necesarios y así alcanzar tiempos interactivos. No sufre de problemas de ruido y provee una buena calidad de imágenes con un rendimiento casi independiente de la complejidad de la escena. Computa hasta dos rebotes de la luz en su camino desde el emisor hacia la cámara, lo que permite incorporar el componente principal de la luz indirecta.

El trabajo surge del interés de los miembros del equipo en técnicas de iluminación global y en vóxeles como primitiva de renderizado. Luego de dos cursos de computación gráfica en los que se trata, por un lado, la creación de ambientes interactivos y por otro la generación de imágenes realistas usando iluminación global, se buscó un algoritmo que permitiera ambas, iluminación global en tiempo real. El proyecto de grado se realiza en el contexto de un ambiente académico, la implementación es open source y apunta a ser un recurso didáctico útil para otras personas interesadas en aprender sobre distintas técnicas de iluminación.

1.1. Organización del documento

Las siguientes secciones de este informe se organizan de la siguiente manera. El capítulo 2 se enfoca en la revisión de antecedentes de la técnica de *voxel cone tracing*. El capítulo 3 se enfoca en detallar cómo funciona el algoritmo y la estructura de datos utilizada para implementarlo. El capítulo 4 presenta algunas decisiones tomadas respecto al desarrollo. El capítulo 5 muestra los resultados de los experimentos realizados con la aplicación implementada, presentados en forma de tablas e imágenes. Finalmente, el capítulo 6 resume los resultados y conclusiones de este trabajo y presenta las funcionalidades y arreglos para implementar a futuro.

Capítulo 2

Revisión de antecedentes

En este capítulo se explican en detalle los conceptos teóricos y los antecedentes más importantes para entender el algoritmo de *voxel cone tracing* y la implementación desarrollada.

En las secciones 2.1 y 2.2 se introducen principios básicos de la luz. Posteriormente, se explican los fundamentos de la iluminación global en 2.3 y 2.4.

A continuación, se describen algunos métodos destacados para lograr iluminación global, como el trazado de rayos, trazado de conos y mapeo de fotones en 2.5, 2.6 y 2.7, respectivamente.

Luego se ven las primitivas usadas en el algoritmo para reducir la complejidad computacional, en 2.8 y 2.9. Finalmente, el capítulo concluye discutiendo las herramientas de programación para GPU disponibles en 2.10.

2.1. ¿Qué es la luz?

Antes de definir el problema de la iluminación global en computación gráfica y hablar de diversos trabajos que se han realizado al respecto, conviene dar un paso atrás y preguntarse, ¿qué es la luz? La pregunta es relevante porque, más allá de las variaciones, la gran mayoría de técnicas de iluminación global se basan en modelar físicamente la luz.

En el libro *Physically Based Rendering*, de Pharr, Jakob y Humphreys [PJH23, p. 177], se brinda una explicación clara y resumida de la historia de la interacción entre los humanos y la luz.

La percepción a partir de la luz es central para nuestra existencia. La incógnita de la naturaleza de la luz ha ocupado las mentes de grandes filósofos y físicos desde el comienzo de los tiempos. La antigua escuela filosófica hinduista

de Vaisheshika (siglos VI a V antes de cristo) veía a la luz como una colección de pequeñas partículas viajando a través de rayos a una alta velocidad. Por otra parte, en el siglo V antes de cristo, el filósofo griego Empédocles postulaba que un fuego divino emergía de los ojos humanos y combinado con los rayos de luz del sol producía visión.

Entre los siglos XVIII y XIX, eruditos como Isaac Newton, Thomas Young y Augustin-Jean Fresnel desarrollaron teorías conflictivas, donde algunas modelaban la luz como consecuencia de la propagación de ondas, y otras de partículas. Al mismo tiempo, André-Marie Ampère, Joseph-Louis Lagrange, Carl Friedrich Gauß y Michael Faraday investigaban las relaciones entre electricidad y magnetismo que culminaron en la repentina y dramática unificación de James Clerk Maxwell en una teoría combinada conocida como **electromagnetismo** [Max73].

La luz es una manifestación con propiedades de onda. El movimiento de partículas eléctricamente cargadas, como electrones dentro del filamento de una bombilla, produce un disturbio en un campo eléctrico circundante que se propaga hacia fuera de la fuente. La oscilación eléctrica también produce una oscilación secundaria de un campo magnético, que a su vez refuerza la oscilación del campo eléctrico, y así sucesivamente. La interacción entre estos dos campos da lugar a una onda que se autopropaga y puede viajar distancias extremadamente largas. Una representación de esto se puede ver en la Figura 2.1, en la que el campo eléctrico (azul) y el magnético (rojo) son perpendiculares el uno al otro y se propagan, avanzando a lo largo de un eje central.

A principios del siglo XX, los trabajos liderados por Max Planck, Max Born, Erwin Schrödinger y Werner Heisenberg condujeron a otro cambio sustancial en el entendimiento de la luz. A nivel microscópico, las propiedades elementales como energía y momento, solo pueden existir como un múltiplo entero de una cantidad base conocida como un **cuanto**. En el caso de las oscilaciones electromagnéticas, este cuanto se conoce como **fotón**. La luz existe como onda y como partícula [Lou65].

Afortunadamente, el complejo comportamiento de onda de la luz aparece en escalas muy pequeñas, por lo que, para la computación gráfica, en la mayoría de los casos se la puede tratar como partícula, lo que simplifica los cálculos [Ake+18, p. 303].

Tratar a la luz como una partícula es el campo de la óptica geométrica, en contraposición a la óptica física. La óptica geométrica trata a la luz como rayos que se mueven en líneas rectas. La óptica física aborda la luz desde el punto de vista de su naturaleza ondulatoria, centrándose en fenómenos como la

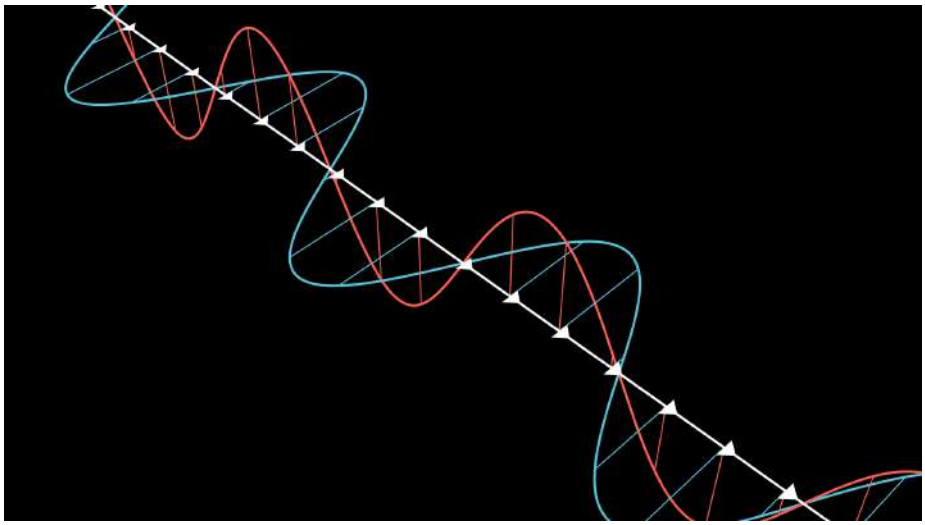


Figura 2.1: Representación de una onda electromagnética propagándose por el espacio.

interferencia, la difracción y la polarización. Dado que las irregularidades de las superficies son en general mucho más grandes que la longitud de onda de la luz, estos fenómenos no ocurren, y se puede tratar la luz como rayos [Ake+18, p. 303]. A su vez, se ignoran otros fenómenos como la fluorescencia y la fosforescencia.

Para simular la luz adecuadamente, es necesario el manejo de las unidades básicas abordadas en la siguiente sección.

2.2. Radiometría: Unidades de la luz

La radiometría provee una serie de herramientas para describir la propagación de la luz. Algunas de estas son la energía radiante, el flujo radiante, la radiosidad, la irradiancia, la intensidad radiante y la radiancia. La descripción de estas unidades surge de [Ake+18, p. 268] y [PJH23, p. 177].

La **energía radiante** es la energía de la radiación electromagnética de la luz. Se mide en joules y se denota con el símbolo Q. Las fuentes luminosas emiten fotones. Cada uno posee una longitud de onda y una energía particular. Un fotón con longitud de onda λ tiene una energía $Q = \frac{hc}{\lambda}$, donde c es la velocidad de la luz y h es la constante de Planck.

El **flujo radiante**, o potencia, es la energía que pasa por una superficie o región del espacio por unidad de tiempo: $\Theta = \frac{dQ}{dt}$. Se mide en joules por segundo,

o watts. En la Figura 2.2 se representa en 2D una luz puntual emitiendo fotones en todas las direcciones. Los círculos de la figura son áreas en las que se mide el flujo radiante que pasa por ellas. Por cada círculo pasa el mismo flujo radiante, dado que la energía y el tiempo son los mismos.

Figura 2.2: Flujo radiante en una luz puntual

Es útil también considerar el área por la cual pasa un flujo radiante. Esta cantidad se llama o **radiosidad** o **irradiancia** dependiendo de si el flujo está llegando o saliendo de una superficie respectivamente. Se define como flujo radiante por unidad de área: $E = \frac{\Theta}{A}$. Estas medidas tienen como unidad watts por metro cuadrado. En la Figura 2.2, la irradiancia en el círculo externo es menor que en el interno, dado que el área aumenta cuadráticamente con la distancia.

Para definir la próxima unidad, es necesario definir el **ángulo sólido**, que es la extensión a 3D del ángulo bidimensional. En 2D, un ángulo mide el tamaño de un conjunto continuo de direcciones en un plano. Para medir esto, se mide el largo del arco resultante de la intersección de este conjunto con un círculo de radio 1. El largo de este arco se mide en radianes. De igual manera, un ángulo sólido mide el tamaño de un conjunto de direcciones en el espacio. Para lograrlo, se mide el área de la intersección del conjunto de direcciones con una esfera de radio 1. La unidad de medida es el estereorradián, cuyo símbolo es *sr*. El ángulo sólido se representa con el símbolo ω. En la Figura 2.3 se puede ver un cono con un ángulo sólido de 1 sr. El ángulo sólido que abarca todas las direcciones posibles mide 4π sr.

La **intensidad radiante** es el flujo radiante dado un ángulo sólido. Se denota $I(\omega) = \frac{d\Theta}{d\omega}$ y se mide en watts por estereorradián (Wsr^{-1}).

La **radiancia** es la unidad radiométrica más importante. Es lo que miden los sensores, como los ojos o cámaras. Se trata de la cantidad de flujo radiante emitida, reflejada, transmitida o recibida por una superficie por unidad de área y por unidad de ángulo sólido. Se denota como L y se mide en watts por metro cuadrado por estereorradián ($Wm^{-2}sr^{-1}$).

El objetivo de evaluar una ecuación de sombreado es calcular la radiancia a

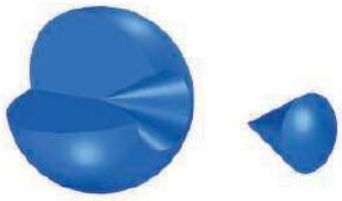


Figura 2.3: Un cono con un ángulo sólido de 1 sr removido de una esfera. Fuente: [Ake+18].

Radiometría (unidad)	**Fotometría (unidad)**
Flujo radiante (W)	Flujo luminoso $(lumen, lm)$
Radiosidad $\left(\frac{W}{m^2}\right)$	Emitancia luminosa $\left(\frac{lm}{m^2} = lux, lx\right)$
Irradiancia $\left(\frac{W}{m^2}\right)$	Iluminancia (lx)
Intensidad radiante $\left(\frac{W}{sr}\right)$	Intensidad luminosa $(candela, cd)$
Radiancia $\left(\frac{W}{(m^2 sr)}\right)$	Luminancia $\left(\frac{cd}{m^2} = nit\right)$

Cuadro 2.1: Unidades de radiometría y fotogrametría.

lo largo de un rayo, desde el punto de vista de la cámara.

La radiometría trata únicamente con cantidades físicas de la luz. En contraposición, un campo relacionado, la fotometría, mide la luz tal como es percibida por el ojo humano, teniendo en cuenta la sensibilidad de este a distintas longitudes de onda. En el Cuadro 2.1 se muestran algunas unidades equivalentes en radiometría y fotometría.

En la siguiente sección se define el concepto de iluminación global utilizando estas unidades.

2.3. Iluminación local e iluminación global

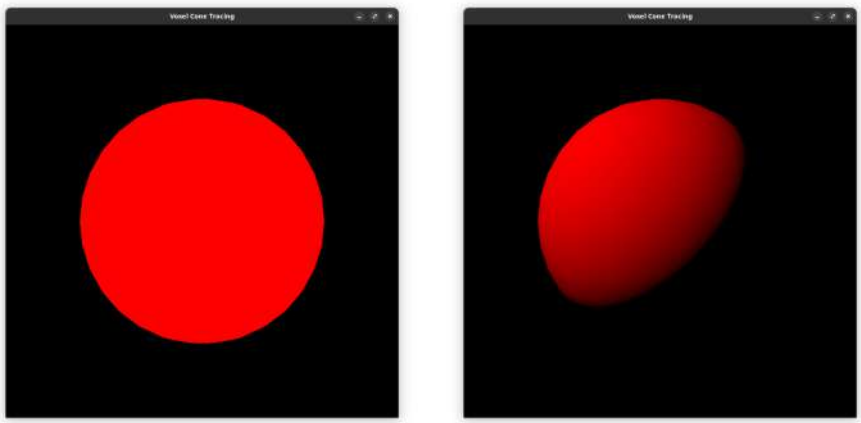
En computación gráfica, la iluminación es crucial para agregar realismo a una escena. Sin embargo, es también uno de los aspectos más desafiantes desde el punto de vista computacional, debido a la complejidad de simular cómo la luz interactúa con los objetos y el entorno.

2.3.1. Iluminación local

La iluminación local [Ake+18, p. 375] es un enfoque más simple y menos demandante computacionalmente, que ayuda a dar una sensación de tridimensionalidad. Consiste en calcular la iluminación directa para cada objeto individualmente, sin considerar la iluminación indirecta que existe entre objetos vecinos. Al no calcular la interacción de la luz con otros objetos, se simplifican significativamente los cálculos necesarios para generar la imagen.

Sus ventajas son su simplicidad y su eficiencia. Su mayor desventaja es que no abarca fenómenos como la refracción, las cáusticas y el sangrado, entre otros.

Un modelo ampliamente utilizado para iluminación local es el de Blinn-Phong [Bli77], que posee tres componentes principales: luz **ambiente**, **difusa** y **especular**. La luz ambiente es uniforme y está presente en toda la escena. No proviene de una fuente de luz en particular y simula el efecto de la luz indirecta que proviene del resto de la escena. La luz difusa representa el efecto de la luz directa que incide sobre una superficie rugosa y se refleja en todas las direcciones, depende del ángulo entre la dirección de la luz y la normal de la superficie. La luz especular depende de la dirección de vista, de la normal de la superficie y de la dirección de la fuente luminosa en cada punto de la superficie. Simula el brillo que se ve cuando la luz se refleja sobre superficies pulidas. En la Figura 2.5 se puede observar este sombreado aplicado a una esfera.



(a) Sin sombreado. (b) Con sombreado difuso.

Figura 2.5: Esfera iluminada mediante el módelo local de Blinn-Phong.

2.3.2. Iluminación global

En contraposición a la iluminación local, la iluminación global calcula la interacción completa de la luz con los objetos de la escena. Se calcula la interacción de la luz entre distintos objetos al reflejarse, refractarse y dispersarse en el entorno.

Su principal ventaja es la mejora en el realismo y coherencia de la escena. Su principal desventaja es la exigencia computacional y la complejidad de implementación, lo que causa dificultades en alcanzar tiempos interactivos.

Entre las técnicas más utilizadas se encuentra el trazado de rayos, la radiosidad [Ake+18, p. 442], el *photon mapping* [Jen01], y el *path tracing* [Kaj86], que serán presentadas a continuación.

En 1986, James T. Kajiya presentó la **ecuación de renderizado**, formalizando varios métodos para el cálculo de iluminación global como aproximaciones a la solución de una misma ecuación, [Kaj86]:

$$I(x,x') = g(x,x') \cdot \left[\epsilon(x,x') + \int_S f(x,x',x'') \cdot I(x',x'') \cdot dx''\right] \tag{2.1}$$

donde:

- $I(x,x')$ se relaciona con la intensidad radiante que pasa del punto x' al punto x.
- $g(x,x')$ es un término de "geometría", evalúa si hay algo interponiéndose en el camino de x' a x.
- $\epsilon(x,x')$ se relaciona con la intensidad emitida desde x' en dirección a x.
- $f(x,x',x'')$ es la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF, por sus siglas en inglés). Se relaciona con la intensidad de luz reflejada desde x'' hacia x a través de x'. En la Sección 2.4 se analizan casos particulares de esta función.
- $S = \cup S_i$, el dominio de la integral, es la unión de todas las superficies de la escena. Los puntos x, x', x'' varían a lo largo de todas las superficies.

En palabras, la Ecuación 2.1 establece que la intensidad que llega a un punto x desde otro punto x', es la intensidad que x' emite en dirección a x más la intensidad reflejada por x' hacia x desde cualquier otro punto de la escena (x''). Todo sujeto a si hay geometría en el camino de x a x', si es que x' "ve" a x.

Los términos "intensidad radiante" e "intensidad emitida" tal y como son planteados no son exactamente ninguna de las unidades radiométricas vistas en la Sección 2.2 pero pueden derivarse de estas.

La Ecuación 2.1 es la base de varios métodos de iluminación global [Ake+18, p. 437]. Tiene en cuenta toda la escena para calcular la luz en un punto. La misma no presenta una solución analítica cerrada para la mayoría de los casos, por lo que se deben calcular soluciones numéricas para su resolución. A su vez, considera toda la iluminación de la escena, incluyendo tanto luz directa como indirecta.

En cambio, la **ecuación de reflectancia** (2.2), derivada de la de renderizado, se enfoca en el cálculo de la luz indirecta.

$$L_o(p, \omega_o) = \int_\Omega f(p, \omega_i, \omega_o) L_i(p, \omega_i) n \cdot \omega_i d\omega_i \tag{2.2}$$

Calcula la radiancia saliente L_o de un punto p y un pequeño ángulo sólido ω_o como una integral sobre el hemisferio Ω centrado en el punto. Sus términos son muy parecidos a los de la ecuación 2.1. Vemos que ya no están ni el término geométrico, dado que se trata de direcciones y no puntos, ni el término de emisión, dado que solo se considera luz indirecta. f es la BRDF. $L_i(p, \omega_i)$ es la radiancia entrante hacia p por otra dirección ω_i. n es la normal en el punto p y $n \cdot \omega_i$ es el producto interno entre la normal y la dirección, que equivale al coseno del ángulo entre ellos. La radiancia saliente es la suma por todo el hemisferio visible Ω centrado en p. La suma de todas las radiancias a lo largo del hemisferio es la irradiancia, como se vio anteriormente.

Se procede a explorar más detalladamente la función f.

2.4. BRDF

La **función de distribución de reflectancia bidireccional** (BRDF, por sus siglas en inglés), es una función $f(x, \omega, \omega')$ que dado un punto x, una dirección ω entrante y una saliente ω', retorna cuánta luz se refleja desde la dirección entrante hacia la saliente en el punto.

Es una característica del material que se puede obtener usando tanto modelos analíticos como midiendo objetos reales con cámaras calibradas y fuentes de luz. A lo largo de los años, se han propuesto varios BRDFs, tanto teóricos como empíricos [MU12]. Los BRDFs son propios de los materiales, y este es uniforme a lo largo de todo el material, por lo que no se diferencia entre dos puntos distintos x y x' del mismo material.

Dos modelos teóricos e ideales comúnmente utilizados son los siguientes:

- Reflexión especular: $f(x, \omega, \omega') = \rho$ cuando ω es simétrico a ω' respecto a la normal. 0 en otro caso.
- Reflexión difusa: $f(x, \omega, \omega') = \frac{\rho}{\pi}$ para todas las direcciones.

ρ es la reflectividad de la superficie, es decir, la fracción de la energía reflejada con respecto a la energía incidente total.

La reflexión especular refleja un rayo solamente en un ángulo específico, mientras que la difusa refleja la luz en todas las direcciones de igual manera.

Los modelos ideales simplifican mucho los cálculos y son físicamente posibles, aunque no existan materiales reales con estas características de reflectancia.

Las secciones anteriores presentaron un modelo para simular la luz. Las posteriores describen algunos métodos para calcularla.

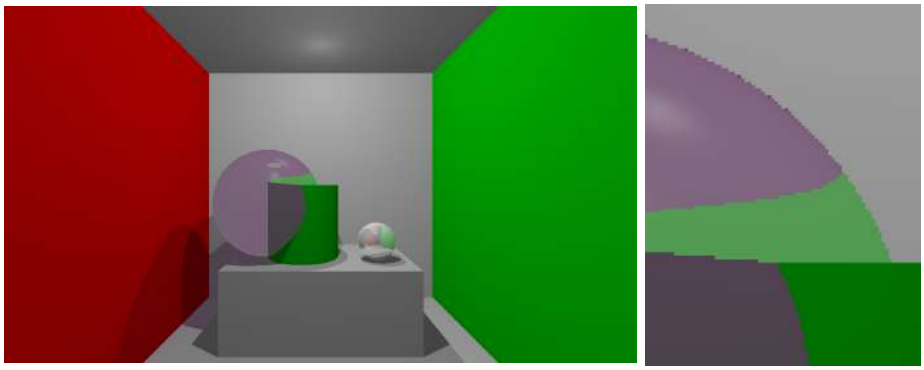
2.5. Trazado de rayos (*ray tracing*)

Uno de los métodos más antiguos y populares para calcular la iluminación global es el de trazado de rayos. Se basa en tratar a la luz como una partícula, trazar el camino que toman los rayos de luz a través de la escena y calcular reflexión, refracción y absorción del rayo cuando interseca con un objeto. La popularidad de este método surge debido a su simplicidad y al gran realismo que agrega a las imágenes generadas. Su primer uso como herramienta de computación gráfica para representar reflexión, refracción y sombras se atribuye a Turner Whitted, [Whi80].

Ray tracing lanza rayos desde la cámara a través de la grilla de píxeles hacia la pantalla. Por cada rayo, se busca la intersección con el objeto más próximo. El punto de intersección se prueba si está en sombra lanzando un nuevo rayo hacia todas las luces de la escena y comprobando si intersecan con algún objeto. Pueden surgir otros rayos desde la intersección. Si la superficie es especular, se genera un rayo en la dirección simétrica a la dirección de vista. Si la superficie es transparente, se genera un rayo en la dirección de refracción, gobernada por la ley de Snell[1]. En la Figura 2.6 se puede ver una imagen generada por este método.

El método sufre de *aliasing*, los bordes escalonados o "dentados" presentes en la figura, que ocurre debido a una falta de resolución, cantidad de píxeles, que no logra capturar todo el detalle de la imagen. Suele notarse al representar curvas (ver Figura 2.6b).

[1] $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$



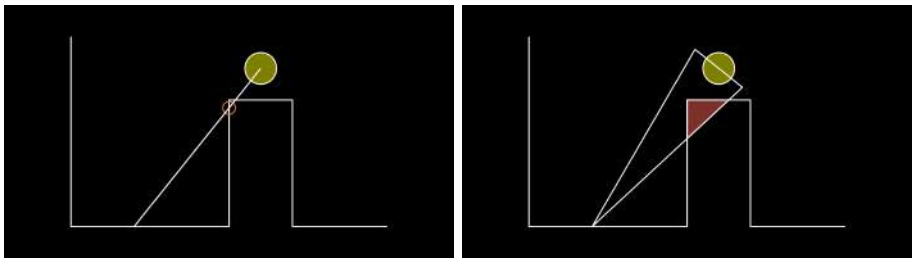
(a) Escena entera. (b) *Aliasing*

Figura 2.6: Escena renderizada con el trazado de rayos de Whitted. Implementación propia. https://github.com/sncalvo/whittedrenderer.

Kajiya propuso en 1986[Kaj86], junto con la ecuación de renderizado, un método llamado *path tracing*, una extensión de *ray tracing* que utiliza integración de Monte Carlo para simular la dispersión de la luz. En lugar de únicamente trazar los caminos de reflexión y refracción si corresponden, muestrea aleatoriamente todos los posibles caminos de la luz, esto incluye caminos en los que la luz se dispersa. Es imposible muestrear todos los caminos posibles de la luz, por lo que un parámetro importante en este tipo de algoritmos es la cantidad de muestras tomadas. Debido a la varianza del muestreo aleatorio, el método sufre de ruido, un granulado en la imagen final. El mismo disminuye a medida que se toman más muestras.

Tanto el *aliasing* como el ruido pueden mitigarse con una técnica llamada *supersampling* [Whi80]. Consiste en tomar más de una muestra por píxel, lo que implica lanzar más de un rayo por píxel y luego promediar los resultados. Promediar las muestras suaviza las curvas, mitigando el *aliasing*, y provee más muestras aleatorias para la integración de Monte Carlo, lo que reduce el ruido. Es una técnica muy costosa dado que implica lanzar cantidades mucho mayores de rayos. Para imágenes complejas, pueden ser necesarios cientos de rayos por píxel para reducir el ruido a niveles aceptables, imposibilitando la generación de imágenes en tiempo real. Otra técnica de reducción de ruido es utilizando *denoisers*, basados en el uso de redes neuronales.

Una variación del trazado de rayos que apunta a reducir el ruido es presentada a continuación.



(a) Rayo de sombra (b) Cono de sombra

Figura 2.7: Los conos de sombra no solo devuelven si hay intersección, también devuelven el porcentaje de área de la intersección

2.6. Trazado de conos

En su artículo de 1984 [Ama84], Amanatides propone una extensión al trazado de rayos en la que sustituye los rayos por conos. Los rayos tienen un origen, una dirección y son infinitesimalmente finos. Los conos tienen también un origen y una dirección, al igual que los rayos. Su principal diferencia es que tienen un ángulo de apertura, lo que les agrega un grosor no despreciable. Usando este grosor, los conos son capaces de no solo probar la existencia de intersecciones, sino también de calcular el porcentaje de área de la intersección. El método fue propuesto para solucionar el *aliasing* presente en el trazado de rayos, como alternativa al *supersampling*. En lugar de lanzar muchos rayos por cada píxel, se lanza un solo cono que integra una mayor área de la escena. Dado que el cono tiene en cuenta la contribución de la luz de varias direcciones dentro de su volumen, reduce el *aliasing* y el ruido al muestrear mayor parte de la escena y reducir la varianza del muestreo.

Trazar conos en lugar de rayos no solo ayuda en el *aliasing* y el ruido, también permite generar sombras suaves. En el trazado de rayos, como se mencionó anteriormente, al probar si un punto se encuentra en sombra o no, se lanza un rayo hacia la fuente de la luz. Si este interseca con algún objeto antes de llegar a la luz, el punto está en sombra. La respuesta binaria, sí o no, a la pregunta de si el punto se encuentra en sombra, resulta en sombras duras. Al trazar un cono en lugar de un rayo hacia la fuente de luz, es posible responder el porcentaje de oclusión de ese punto, lo que produce una escala de grises y sombras suaves. En la Figura 2.7 se ve un diagrama mostrando este comportamiento.

El trazado de conos, al igual que el trazado de rayos, halla las intersecciones entre cono y objeto de manera analítica. Se toman en cuenta los distintos tipos

de objetos (esfera, plano, entre otros) y se resuelve la ecuación de intersección entre ellos.

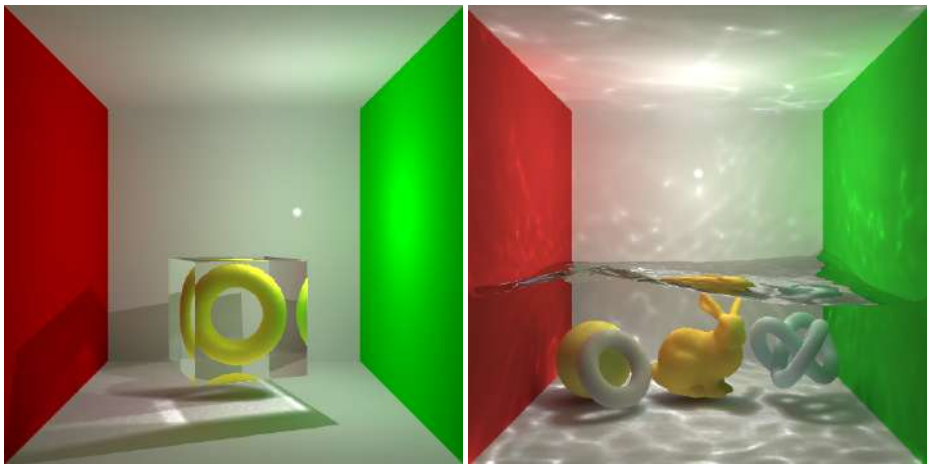
Para calcular la luz indirecta se halla la radiancia saliente de un punto p en dirección a la cámara. En *path tracing*, éste valor se calcula aproximando la integral sobre el hemisferio con el método de Monte Carlo. Se toman varias muestras, rayos lanzados desde el punto p en todas las direcciones ω_i. En el caso del trazado de conos, se particiona el hemisferio en secciones que pueden ser aproximadas mediante estos conos.

El siguiente método extiende el trazado de rayos para poder representar nuevos efectos de la luz.

2.7. Photon Mapping

Photon Mapping, propuesto por Henrik Wann Jensen en 2001 [Jen01], es un algoritmo basado en el trazado de rayos que es capaz de simular de manera más realista la refracción de la luz a través de sustancias transparentes como el vidrio o el agua. Funciona "emitiendo" fotones de la fuente de luz y almacenando en un mapa de fotones la ubicación de cada interacción de estos con las superficies no especulares ni transparentes de la escena.

Con *photon mapping* se pueden generar cáusticas, los dibujos que se generan cuando una superficie especular o transparente concentra la luz en una superficie difusa. En la Figura 2.8 se puede ver este efecto.



(a) Con vidrio (b) Con agua

Figura 2.8: Cáusticas. Fuente: [Wan+09]

(a) Solo luz directa. (b) Solo luz indirecta.

(c) Todo junto

Figura 2.9: Photon mapping en tiempo real. Fuente: [SA19].

El algoritmo comienza con una etapa en la que se lanzan fotones desde la fuente de luz hacia la escena. Estos se almacenan en las superficies difusas de la escena, creando un **mapa de fotones** y se usan en una segunda etapa cuando se calcula el color de cada píxel. Además de los rayos de ray tracing de reflexión y refracción, se lanzan rayos adicionales en direcciones aleatorias que buscan en el mapa de fotones, simulando la reflexión difusa. Es una extensión a ray tracing, que utiliza el paso adicional de lanzado y evaluación de fotones.

Al igual que con el trazado de rayos, varias mejoras y optimizaciones han surgido a lo largo de los años. Variantes de la técnica original han sido desarrolladas haciendo uso de tarjetas gráficas, alcanzando el tiempo real [SA19]. Se pueden ver imágenes generadas por esta técnica en la Figura 2.9.

Una optimización posible es la aproximación de la geometría de la escena.

(a) Vóxeles representando humo. Fuente: [FSJ01].

(b) Vóxeles representando vegetación. Fuente: [DN04].

Figura 2.10: Vóxeles para renderizar humo y vegetación

Una primitiva utilizada para esto son los vóxeles.

2.8. Vóxeles

Un vóxel es el equivalente de un píxel en el espacio 3D. Así como un píxel es un elemento de imagen o ***pi****cture* ***el****ement*, un vóxel es un elemento de volumen, ***vo****lume* ***el****ement* [Ake+18]. Similar a como los píxeles se ubican en una grilla que divide una superficie 2D en secciones cuadradas, los vóxeles dividen un volumen 3D en cubos.

Tradicionalmente, se usan para guardar datos volumétricos y como primitiva para renderizar una variedad de objetos. Permiten representar volúmenes, en contraposición al triángulo, que se utiliza para representar únicamente superficies. Son un buen candidato para renderizar volúmenes y modelos 3D como el humo, la niebla, el fuego, los huesos y el terreno, entre otros. Algunos de estos elementos se ven en la Figura 2.10.

Cada vóxel marca si la zona del espacio que representa está ocupada o libre. Pueden tener más información. Por ejemplo, en contextos médicos se usan para indicar la opacidad y densidad de un hueso. Para el renderizado, se pueden utilizar para almacenar valores como el color o la irradiancia. En general, no es necesario guardar la posición de un vóxel, ya que su lugar en la grilla ya lo indica.

El proceso de convertir otra representación, por ejemplo, una malla de polígonos, en una estructura de vóxeles se llama **voxelización**. Involucra intersecar

la representación poligonal con la grilla de vóxeles, y marcar los vóxeles que se solapen con esta.

Algunos programas usan grillas completas de vóxeles. Sin embargo, en la mayoría de los casos no es necesario. En muchas aplicaciones es suficiente tener vóxeles solo en los límites entre los objetos y el espacio vacío. Es innecesario el relleno.

Si bien más vóxeles permiten representar más detalle, esto se vuelve muy costoso rápidamente. Es posible minimizar la cantidad de vóxeles, manteniendo el nivel de detalle, subdividiendo solo en las zonas con geometría más compleja. Estos vóxeles utilizan una estructura de datos conocida como un *octree* disperso, explicado a continuación.

2.9. Octrees

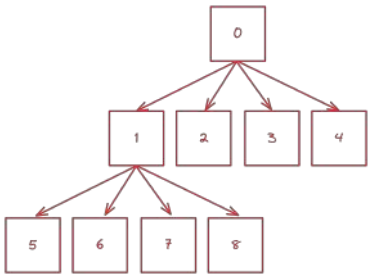
Un *octree* es una estructura de datos de "árbol", en la que cada nodo interno (no hoja) tiene 8 hijos [Ake+18]. Suele usarse para representar datos espaciales [BD02]. Se puede utilizar para dividir el espacio 3D de manera jerárquica, en varios niveles.

Para construir uno, se parte de un volumen original cúbico o paralelepípedo que se divide en dos partes iguales por dimensión, resultando en 8 octantes iguales. En la estructura de árbol, el nodo raíz representa el volumen original y cada uno de sus 8 hijos, representa a cada octante. Aplicando recursivamente, se divide el espacio en $8^{(n-1)}$ secciones, donde n es la cantidad de niveles del árbol, y el primer nivel tiene un solo nodo que representa toda la escena.

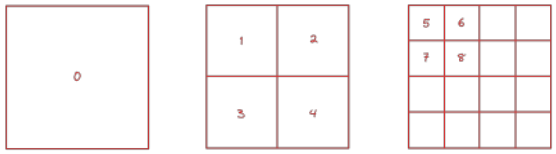
De manera similar, un espacio 2D se puede dividir utilizando un *quadtree*, en donde cada nodo interno tiene 4 hijos. Los *quadtrees*, al ser bidimensionales, son más fáciles de visualizar, por lo que serán utilizados a lo largo de este informe para explicar aspectos que funcionan igual tanto en ellos como en su equivalente tridimensional. En la Figura 2.11 se muestra un *quadtree* en su forma de árbol y en el espacio que subdivide.

Cuando la naturaleza de la información lo permite, se puede evitar subdividir un nodo del árbol si sus 8 hijos tienen todos la misma información. De esta idea surge el *octree* disperso.

A la hora de voxelizar una escena, los vóxeles pueden ubicarse dentro de un *octree* disperso, en lugar de en una grilla. En este caso, los nodos no se subdividen si no hay geometría dentro de la región del espacio que representan, dado que no hay vóxeles en esa región.



(a) Visto en su estructura de árbol, con punteros a cada hijo



(b) Visto espacialmente

Figura 2.11: Quadtree

La última sección de este capítulo introduce herramientas para la programación en GPU.

2.10. Ducto gráfico

Dada una escena 3D, una cámara virtual, varios objetos y varias fuentes de luz, ¿cómo se genera una imagen 2D en el monitor de una computadora?

Si bien es posible generar una imagen a partir de una escena usando la CPU, las GPU, o tarjetas gráficas, fueron específicamente diseñadas para esto.

Las tarjetas gráficas ejecutan un **ducto gráfico** para generar las imágenes, esto es, una secuencia de transformaciones y operaciones que parten de primitivas y generan la imagen final. Existen varios tipos de ductos gráficos, el ducto de rasterización, el de cómputo de propósito general, el de trazado de rayos, entre otros.

El ducto de rasterización, Figura 2.12, es importante, dado que es utilizado en *voxel cone tracing*. Este ducto parte de vértices de mallas poligonales, aplica transformaciones, realiza pruebas de profundidad y calcula el color de cada píxel de la imagen final.

Cada paso de un ducto gráfico puede ser fijo o programable. En el caso de que sea fijo, el mismo ya está implementado en la tarjeta gráfica. En algunos casos, estos pasos fijos proveen parámetros para configurar su comportamiento, este es

su mayor grado de libertad. En el caso de que sea programable, se puede escribir un *shader*, un programa de sombreado que ejecuta en la GPU, que implementa el paso en su totalidad, aportando una gran libertad a la hora de renderizar escenas.

Existen varias API, o interfaces, con las que se puede interactuar con una tarjeta gráfica [Gal21], notablemente Vulkan, Direct3D, Metal, WebGPU y OpenGL. Todas estas permiten acceder al ducto de rasterización.

En OpenGL, por ejemplo, este ducto posee las etapas que se ven en la Figura 2.12 [Ake+18].

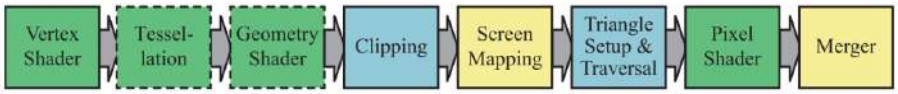


Figura 2.12: Ducto de rasterización. Fuente: [Ake+18]

El desarrollador debe escribir *shaders* para las etapas programables, que se pueden escribir en el lenguaje GLSL [Khr23]. Los *shaders* son programas que ejecutan en la GPU con un alto grado de paralelización en la tarjeta gráfica.

Las etapas programables son el *vertex shader* (*shader* de vértices), *geometry shader* (geometría), y *fragment* o *pixel shader* (fragmentos o píxeles). Cada una de estas etapas pueden comunicar datos a etapas posteriores. El resto de las etapas son fijas.

El *vertex shader* toma los vértices de la geometría de la escena y los puede transformar a otro sistema de coordenadas. En general es usado para pasar los vértices de espacio local de coordenadas a espacio global, de vista y luego proyección, lo que se logra usando tres matrices que se conocen como matriz de modelo, matriz de vista y matriz de proyección. Un hilo es ejecutado por cada vértice de las primitivas de entrada.

El *geometry shader* puede generar nuevos vértices, por lo que es útil para agregar complejidad extra a la geometría de la escena. Aquí se ejecuta un hilo por cada primitiva de salida del *vertex shader*. Estas primitivas pueden tener más de un vértice.

Finalmente, el *fragment shader*, o *pixel shader*, trabaja con píxeles y no con vértices. Es en este *shader* donde se realizan los cálculos de iluminación para calcular el color de cada píxel. Se ejecuta como mínimo un hilo por cada píxel no vacío de la imagen que se quiere generar. Pueden ejecutarse más de uno en el caso que dos objetos aporten color al mismo píxel, en cuyo caso puede ser que uno sea descartado o pueden mezclarse los colores de ambos en caso de que

presenten una opacidad menor a 1.

Otro ducto muy relevante, que es usado para implementar la mayoría del algoritmo, es el ducto de cómputo de propósito general. Consiste en la inicialización de datos de entrada, luego la ejecución de un programa en la GPU llamado *compute shader* (*shader* de cómputo) y finalmente el retorno de datos hacia la CPU. Notar que este ducto no es utilizado para generar una imagen, sino para realizar cálculos arbitrarios que toman una entrada y producen una salida, aprovechando la alta paralelización que provee la tarjeta gráfica.

Capítulo 3

Voxel cone tracing

En este capítulo se detalla el diseño de *voxel cone tracing* [Cra+11], un algoritmo de iluminación global en tiempo real, que utiliza conceptos presentes en el trazado de rayos (2.5), trazado de conos (2.6) y *photon mapping* (2.7), pero reduciendo los costos asociados a estos algoritmos clásicos mediante el uso de una representación de la escena con vóxeles (2.8), almacenada en un *octree* disperso (2.9), para aproximar los conos.

Este algoritmo ejecuta en la GPU, utilizando el ducto de rasterización visto en la Sección 2.10. Los cálculos de luz son realizados en el *fragment shader*. Lo anteriormente propuesto, difiere del trazado de rayos clásico, que, en cambio, renderiza toda la escena puramente mediante intersecciones entre rayos y geometría.

La principal aproximación que realiza este algoritmo es trabajar sobre una representación voxelizada y prefiltrada de la escena. Dadas las coordenadas de un punto de la escena, se recorre el árbol para hallar el vóxel que representa la región del espacio que incluye ese punto. Este vóxel contiene toda la información necesaria sobre oclusión, color e irradiancia debido a que la estructura es previamente filtrada. En el filtrado, la información en las hojas del árbol es promediada hacia niveles mayores, hasta que cada nivel del árbol contiene información que aproxima el contenido de las capas inferiores.

La información de un vóxel en cada nivel resume la información de los vóxeles de los nodos hijos que comparten el mismo espacio en la escena. Se vio en la Sección 2.5, trazado de conos que, en su planteo original, se hallaban las intersecciones del cono con los objetos de la escena de manera analítica, lo cual es más costoso. Aquí, en lugar de hallar la intersección analíticamente, se aproxima el cono utilizando la estructura jerárquica de vóxeles, permitiendo

acumular la información a lo largo del cono más eficientemente, pero con cierta pérdida de detalle.

El algoritmo se puede dividir en 4 grandes etapas:

1. Voxelización de la escena.
2. Construcción y filtrado del *octree* disperso.
3. Inyección de fotones.
4. Trazado de conos.

La voxelización, la inyección de fotones y el trazado de conos usan el ducto de rasterización, mientras que la construcción del árbol y el filtrado usan el ducto de cómputo de propósito general. En el resto del capítulo se explicará con mayor grado de detalle cada una de estas etapas.

3.1. Voxelización

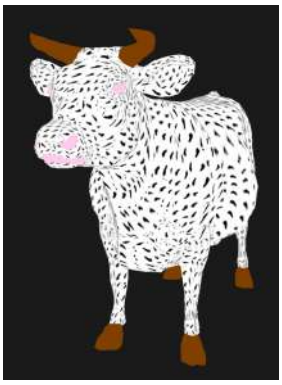
La voxelización es el proceso de convertir un modelo 3D en una grilla 3D de vóxeles. La cantidad de vóxeles, o resolución, es configurable, siendo usualmente 512 o 1024 por dimensión, totalizando 512^3 o 1024^3 vóxeles respectivamente. Un ejemplo de voxelización se muestra en la Figura 3.1, con resoluciones de 64, 128 y 256.

Para voxelizar la escena, se realiza el procedimiento detallado en "OpenGL Insights, capítulo 22" [CG12], un aporte escrito por Crassin luego de haber publicado el artículo de *voxel cone tracing*, aprovechando mejoras en las herramientas disponibles en el momento. Ese mismo proceso será explicado a continuación. Consultar la referencia para más información.

Usando el ducto de rasterización de OpenGL, se procesan todos los triángulos de la geometría de la escena, utilizando como resolución para el rasterizado, la resolución de la grilla de vóxeles. Esto genera una lista de **vóxeles**, donde cada vóxel es una posición dentro de la grilla y un color, siendo éste el color de un triángulo que interseca con el espacio representado por el vóxel. Cada uno de estos vóxeles será utilizado para construir el árbol y terminará almacenado en la estructura.

Dado lo anteriormente descrito, el mismo vóxel, identificado por su posición en la grilla, puede estar presente en la lista múltiples veces con colores diferentes si más de un triángulo interseca con él. Estos se promedian para culminar en el color final del vóxel.

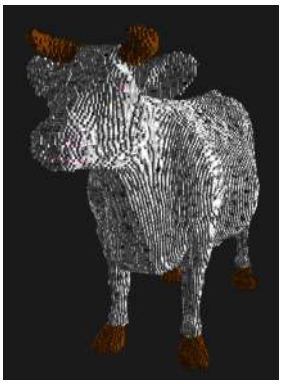
La voxelización de un triángulo B a un vóxel V puede hacerse si:



(a) No voxelizado.

(b) Voxelizado (64^3).

(c) Voxelizado (128^3).



(d) Voxelizado (256^3).

Figura 3.1: Ejemplo de voxelización con la cantidad de vóxeles por dimensión entre paréntesis.

1. El plano de B interseca V.
2. La proyección 2D del triángulo B por la dimensión dominante de su normal, la que provee la mayor área proyectada, interseca la proyección 2D de V.

Basado en esta observación, se sigue la serie de pasos que se muestra en la Figura 3.2.

Primero, cada triángulo de la geometría se proyecta ortográficamente en la dimensión dominante de su normal. La dimensión dominante se elige dinámicamente por triángulo en el *geometry shader*, donde la información de los tres vértices de cada triángulo está disponible, maximizando el área del triángulo proyectado.

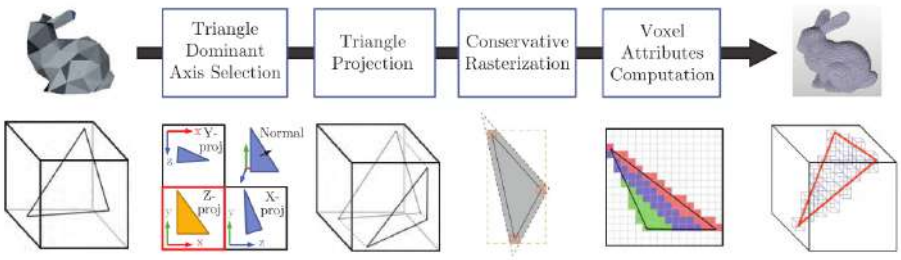


Figura 3.2: Ducto de voxelización. Fuente: [CG12].

Cada triángulo proyectado se rasteriza para conseguir fragmentos correspondientes a la resolución 2D de la grilla de vóxeles. Se fija el tamaño del *viewport* para coincidir con la cantidad de vóxeles, por ejemplo, un *viewport* de tamaño 512×512 para una grilla de 512^3 vóxeles.

Durante la rasterización, cada triángulo genera un conjunto de fragmentos 2D. Estos fragmentos generarían solo un vóxel en la grilla si esta fuese 2D. Sin embargo, al ser una grilla 3D, un triángulo cuyo plano no es perpendicular a su dirección dominante puede intersecar con más de un vóxel en la dirección de proyección.

Es necesario calcular la intersección del plano del triángulo con los vóxeles para encontrar los valores de profundidad en la grilla, ya que el triángulo fue proyectado perdiendo sus valores de profundidad. Debido a la elección de la dimensión dominante de la normal para la proyección del triángulo, cada fragmento puede generar de 1 a 3 vóxeles con mismos valores de x e y pero diferentes valores de z, fuese z la dirección dominante.

Por cada fragmento 2D, los vóxeles que intersecan con el triángulo, se calculan en el *fragment shader*, basándose en la posición, la profundidad y las derivadas de la profundidad en espacio de pantalla. Las derivadas son necesarias para calcular la orientación del plano del triángulo, ya que los fragmentos no tienen información global del triángulo que los generó, solamente datos del punto responsable de su generación.

Luego de realizada la voxelización, se obtiene la lista de vóxeles necesaria para crear el árbol. Cada uno tiene sus coordenadas en $\mathbb{N}^3$ que lo identifica dentro de la grilla 3D de la escena, así como color. Su posición en el espacio de la escena, se puede calcular a partir de su posición en la grilla.

3.1.1. Rasterización conservativa

El método descrito anteriormente a veces no crea vóxeles para elementos muy finos, como una asta de bandera, ya que en el rasterizado solo se prueba el centro del píxel contra los triángulos, para generar fragmentos. Se necesita una manera de generar fragmentos para cada píxel tocado por un triángulo, y no solamente en el centro. Un algoritmo así se detalla en [HAO05].

Se genera, por cada triángulo, un polígono acotante ligeramente más grande que asegure que cualquier triángulo proyectado que interseque con cualquier punto del píxel, también interseque con su centro. Para lograrlo, se trasladan las aristas del triángulo hacia afuera, una distancia equivalente a la mitad de la diagonal de un píxel y extendiéndolas, para generar un triángulo semejante de mayor tamaño.

Este proceso genera fragmentos nuevos que resultan de sobreestimar la cobertura del triángulo, ya que este nuevo triángulo puede intersecar con el centro de píxeles que antes no eran alcanzados. Para evitar estos fragmentos innecesarios se genera una caja acotante alineada con los ejes (AABB), y se descartan fragmentos por fuera de la misma. El proceso se muestra en la Figura 3.3.

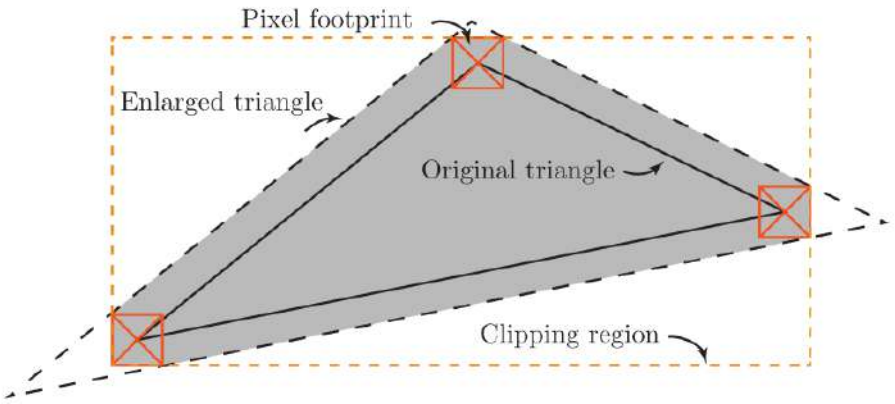


Figura 3.3: Rasterización conservativa. Fuente: [CG12].

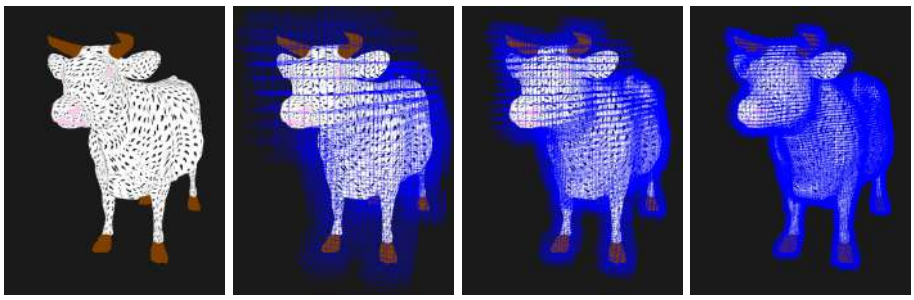
3.2. *Octree* disperso

Los vóxeles generados se almacenan en un *octree* disperso, como los vistos en la Sección 2.9. Un octree denso subdivide la escena en 8 cubos y cada cubo se

subdivide en 8, y así sucesivamente. Esta estructura escala rápidamente, generando problemas importantes de volumen y velocidad de los accesos necesarios a la memoria. Los *octrees* dispersos alivianan este problema, donde los nodos no se subdividen si no poseen geometría dentro del espacio que representan.

Cada elemento del árbol es un **nodo**. Un nodo del árbol representa una sección de la escena. Cada nivel tiene una cierta cantidad de nodos. En un árbol denso, cada nodo interno, no hoja, tiene exactamente 8 hijos, por lo que cada nivel n tiene 8^n nodos. El nivel 0 tiene $2^{(0\times3)} = 1$ nodo, el nivel 1 tiene $2^{(1\times3)} = 8$, el 2 tiene $2^{(2\times3)} = 64$ y así sucesivamente. El último nivel del árbol es el que llega a la resolución deseada de 512 o 1024 vóxeles. Valores más altos de resolución, crean más niveles del *octree* y hacen que la aproximación de vóxeles se asemeje cada vez más a la malla de triángulos original.

En la Figura 3.4, se muestra un modelo al que luego de ser voxelizado, se le creó un *octree* disperso. La resolución utilizada fue de 128 vóxeles por dimensión, por lo que el último nivel del *octree* es el 7. En la Figura se muestran los niveles 5, 6 y 7. Se puede observar cómo se asemejan cada vez más a la malla original.



(a) Modelo. (b) Octree nivel 5. (c) Octree nivel 6. (d) Octree nivel 7.

Figura 3.4: Distintos niveles de un octree disperso.

Dado que la estructura tiene como máximo 512 o 1024 vóxeles de resolución, sin importar la geometría de la escena, los cálculos sobre ella son independientes de la complejidad de la geometría.

3.2.1. Nodos, bricks y vóxeles

Los nodos del árbol no almacenan los vóxeles mencionados en la Sección 3.1. Cada nodo almacena únicamente un puntero a sus, como máximo, 8 hijos.

Cada nodo tiene asociado un **brick**, otra estructura que también representa una región del espacio. Cada brick se divide en 27 vóxeles, distribuidos en una

estructura de $3 \times 3 \times 3$. Son estos vóxeles, los que almacenan los valores de la escena. Los nodos solamente contienen punteros a sus hijos, existen para obtener la estructura del árbol. Los nodos proveen la estructura mientras que los bricks y vóxeles los datos.

En la Figura 3.5 se puede observar un nodo con su brick asociado de la manera en la que se disponen en el espacio. Los bricks ocupan más espacio que sus nodos, ya que los vóxeles se centran en los vértices, aristas, caras y el centro del nodo. Esto es necesario para que los bricks compartan información con bricks de nodos vecinos, lo que garantiza que la interpolación dentro de un solo nodo, tome en cuenta los valores de sus vecinos. Colocar los vóxeles en las esquinas de los nodos genera una frontera compartida entre bricks de nodos vecinos, como se puede ver en la Figura 3.6.

La frontera entre dos nodos adyacentes del mismo nivel, son los 9 vóxeles de la cara compartida entre los bricks, que serían 3 en el caso 2D, el cual es apreciable en las figuras, que están presentes en los bricks de ambos nodos. Como consecuencia, la estructura tiene información repetida, necesaria para que funcione la interpolación cuando se quiera generar la imagen final. Un *shader* llamado *border_transfer*, logra la coherencia en la frontera entre dos *bricks*. Se explicará en la Sección 3.2.3.

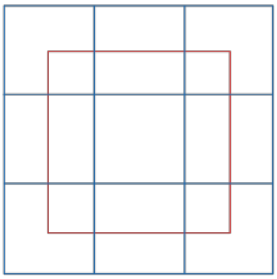


Figura 3.5: Nodo (en rojo) con su brick asociado (azul).

3.2.2. Construcción

Para generar el octree disperso se usa la lista de vóxeles generada durante la voxelización. Se empieza con un árbol con un solo nivel y con un solo nodo que representa toda la escena. Empezando en el primer nivel del árbol y descendiendo a lo largo de los niveles, se subdividen los nodos que contienen geometría. Un nodo debe ser subdividido cuando existe un vóxel en la lista con coordenadas dentro del nodo y no se llegó aún a un cierto nivel deseado del árbol. El

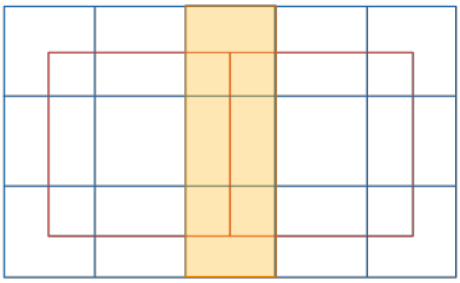


Figura 3.6: Solapamiento entre vóxeles de bricks de nodos vecinos.

algoritmo utilizado se detalla a continuación.

Dado un nivel i del árbol, dos *shaders* principales son ejecutados en secuencia para generar el nivel $i + 1$: *flag_nodes* y *allocate_nodes*.

Se lanza un hilo de *flag_nodes* por cada vóxel de la lista de vóxeles. Dado un vóxel, se recorre el árbol, hasta llegar al nivel i, el último creado hasta el momento. Para la recorrida, cada hilo comienza en su primer nodo. Al llegar a un nodo en el nivel i, se marca uno de los 8 punteros a sus hijos. Cada hijo del nodo representa un octante en el espacio dentro de él. Se usa la posición del vóxel para determinar a qué octante pertenece. El puntero a este hijo es marcado.

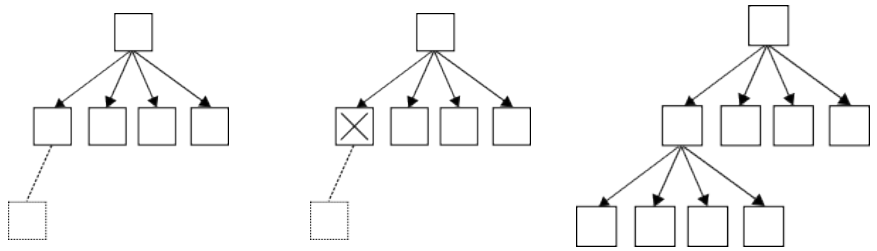
Realizar esta marca es un proceso idempotente, ya que se limita a cambiar el bit más significativo del puntero a 1. Es idempotente porque el resultado de la operación es el mismo, sin importar la cantidad de hilos que lo realicen.

Luego, se ejecuta *allocate_nodes*, que busca en el nivel i los punteros marcados. Se lanza un hilo por cada posible nodo hijo que puede ser creado en esta etapa, 8 por cada nodo del nivel i. A cada hilo se le asigna uno de los punteros de los nodos del nivel, se confirma si fue marcado en el paso anterior, se elimina la marca, se le crea el nodo hijo y le es agregado al puntero el índice del hijo recién creado. El índice del nuevo hijo se crea usando un contador que es posteriormente incrementado. Para el incremento, se usa una operación atómica que permite que dos hilos puedan crear un nodo concurrentemente, sin colisión de índices. Siempre que haya geometría en la región de la escena representada por un nodo, el mismo será subdividido nivel tras nivel hasta el máximo determinado por la resolución de la grilla de vóxeles.

Esta separación entre marcar y subdividir, es necesaria para prevenir problemas de concurrencia, al ser este proceso ejecutado en múltiples hilos. Durante la construcción de un nivel interno del *octree*, es probable que muchos hilos marquen la creación de un mismo nodo hijo. Si el mismo hilo que se encarga de crear

la marca, también creara el nodo, se tendrían nodos duplicados perdidos dentro de la memoria. En lugar de lidiar con que todos esos hilos intenten subdividirlo, se limitan a marcarlo de manera idempotente, evitando así utilizar *locks* entre hilos. Correr un solo hilo para cada posible hijo que se debe crear, asegura que no se creen nodos duplicados, resolviendo así el problema de concurrencia.

Un paso de este algoritmo se puede observar en la Figura 3.7. Al ejecutar el algoritmo para un vóxel x, este debe ser ubicado en el último nivel, en el nodo punteado. El nodo inmediatamente anterior se marca para subdividir y luego se subdivide.



(a) El vóxel debe ir en el nodo punteado.

(b) El nodo padre es marcado para ser subdividido.

(c) El nodo marcado es subdividido.

Figura 3.7: Un paso del algoritmo de *flag* y *allocate*.

Una vez alcanzado el último nivel, se escriben los atributos de los vóxeles en los bricks de las hojas del árbol, promediando cuando más de un vóxel tiene la misma posición en la grilla de vóxeles. Mientras más triángulos tenga la escena original y menos resolución la grilla de vóxeles, más triángulos se promedian, perdiéndose detalles.

En la Sección 3.2.1, se vio como los *bricks* ocupan una región más amplia del espacio que su nodo correspondiente. Además, los vóxeles conseguidos en la voxelización no están alineados espacialmente con los vóxeles de los bricks. Esto genera que un vóxel proveniente de la voxelización comparta el mismo espacio con varios vóxeles de los bricks, y viceversa.

En la primera parte de la Figura 3.8 se puede observar un brick, cuyos vóxeles están numerados, solapado con 4 vóxeles generados en el paso de voxelización, cada uno con su color. En el espacio de la escena estos coinciden con el nodo del brick, ya que la grilla utilizada para la voxelización es la misma que la determinada por los nodos del nivel más bajo, pero llegando a un nivel mayor de resolución. Por lo que, a cada nodo le corresponden a lo sumo 8 vóxeles del paso de voxelización, si consideramos que triángulos que se solapan en un vóxel

de la grilla devuelven un único vóxel con el promedio de sus colores.

(a) Solapamiento en el espacio de la escena entre el brick y los vóxeles.

(b) Brick con el valor de los vóxeles almacenados.

Figura 3.8: Vóxeles de la voxelización y su asignación a un brick.

Para la versión 2D a cada nodo le corresponden a lo sumo 4 vóxeles del paso de voxelización. Se le asignan valores a todos los vóxeles del brick, utilizando la Figura 3.8 como ejemplo, como se detalla a continuación:

- El vóxel 4 almacena el promedio de azul y rojo
- El vóxel del medio de cada arista almacena el promedio de los 2 valores que le corresponden y espacio vacío, siendo el vóxel 3 un azul semitransparente con una opacidad de 0.5
- El vóxel de cada esquina almacena tres cuartas partes de espacio vacío, y el color correspondiente, siendo el vóxel 2 de color rojo con una opacidad de 0.25

Como resultado, se esparcen los valores de los vóxeles del paso de voxelización a los vóxeles del *brick*. De esta Figura también se desprende la necesidad del *border_transfer*, descrito en la siguiente sección, ya que los vóxeles contienen valores parciales y deben completarse con información de los nodos vecinos. Lo anteriormente descrito es el algoritmo que expande los vóxeles para poder llenar las $3 \times 3 \times 3$ subdivisiones del *brick*. Por el resto de este trabajo, el término "vóxel" refiere a una de las 27 subdivisiones de un *brick*, dado que ya se procesó la lista generada durante la voxelización.

3.2.3. Border transfer

Como se mostró en la Figura 3.6, los vóxeles frontera entre dos *bricks* adyacentes corresponden al mismo espacio en la escena. Sin embargo, cada nodo tiene su propio *brick*, pero esos *bricks* no comparten memoria entre ellos, habiendo así

vóxeles que pertenecen a *bricks* diferentes, pero corresponden al mismo espacio en la escena. Es necesario que los valores almacenados en esos vóxeles frontera tengan el mismo valor para asegurar coherencia y una correcta interpolación a la hora de generar la imagen final. Sin embargo, luego de aplicar *spread_leaves*, los vóxeles frontera pueden tener valores distintos entre *bricks* vecinos. Para igualarlos, se promedian los valores de la frontera con la del *brick* vecino. A su vez, este paso es necesario para completar los valores parciales vistos en la sección anterior.

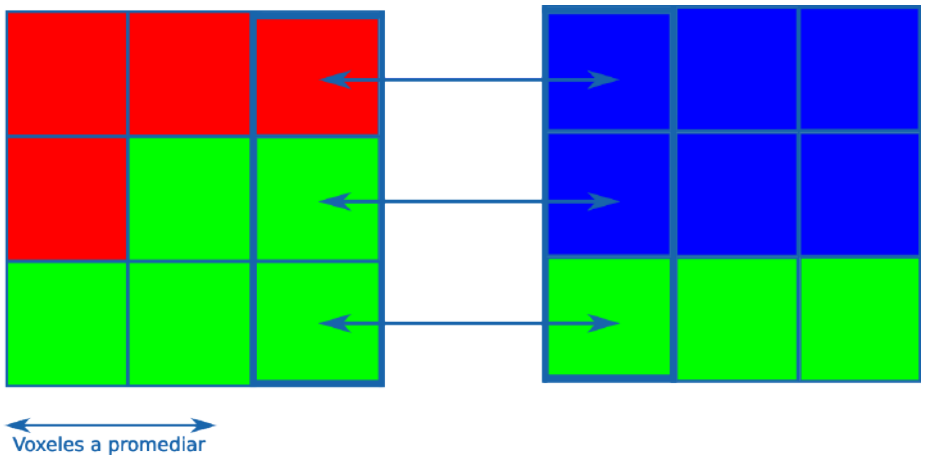
El shader *border_transfer* se encarga de promediar los valores en la frontera de cada *brick* con la de sus vecinos, en los ejes X, Y y Z. De esta manera, aun cuando un vóxel puede estar en varios *bricks*, en 8 como máximo para los vóxeles en las esquinas de los *bricks*, su valor va a ser siempre el mismo en cada uno de ellos. En la Figura 3.9 se puede apreciar este proceso, realizado para el eje X, entre dos *bricks* vecinos con los vóxeles que comparten enmarcados.

3.2.4. Nodos frontera

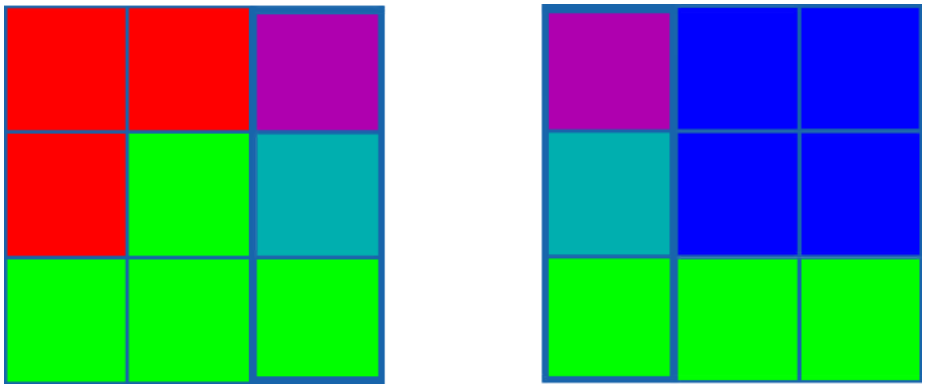
El paso anterior asume, incorrectamente, que todos los nodos tienen vecinos. Al usar un *octree* disperso, no existen nodos en donde no hay geometría. Como se vio en la Sección 3.2.3, para mantener coherencia dentro de la estructura todo par de bricks vecinos deben tener valores iguales en sus vóxeles frontera. En el límite entre la geometría y el espacio vacío existen nodos sin vecinos. Estos nodos presentan un problema que impide una correcta interpolación, dado que no se puede promediar el valor de sus vóxeles con su vecino. Para una correcta interpolación, es necesaria una capa de nodos extra, los que llamaremos **nodos frontera**, que representa el espacio vacío adyacente a la geometría.

Los nodos frontera se añaden en cada nivel del árbol a la hora de construirlo. Sus *bricks* en principio no contienen valores, existen para asegurar una correcta interpolación en los extremos de la geometría. Se realiza un *border_transfer* extra entre los nodos frontera y sus vecinos, de manera que los vóxeles compartidos entre ambos tengan el mismo valor. No se vuelve a generar, entonces, el mismo problema entre los nodos frontera y el espacio vacío, dado que los vóxeles compartidos entre ellos tienen opacidad nula. La diferencia causada por los nodos frontera al generar la imagen final se puede ver en la Figura 3.14.

En el algoritmo de *cone tracing*, se toma la intersección del cono con el nodo. Luego se toma una muestra del *brick*, en el lugar donde interseca con el cono. Para mejor entender el problema solucionado por los nodos frontera, veamos un ejemplo usando un rayo en lugar de un cono.



(a) *Bricks* vecinos antes del border transfer.



(b) *Bricks* vecinos después del border transfer.

Figura 3.9: *Bricks* vecinos en el *eje X*.

Consideremos un nodo como el de la Figura 3.10, cuyo *brick* asociado tiene sus vóxeles numerados. Este nodo no tiene vecinos. Su vóxel 6 es de color azul y su vóxel 7 color rojo, ambos con opacidad 1. Si se tiene un rayo que interseca en algún punto entre ambos vóxeles, como puede verse representado con un punto rojo en la Figura 3.10, el valor muestreado será violeta con un mayor componente azul, la interpolación lineal entre ambos.

Si un rayo interseca con el centro del vóxel como en la Figura 3.11, el color muestreado será azul con opacidad 1.

¿Pero qué ocurre cuando el rayo interseca como se ve en la Figura 3.12? Siguiendo la misma lógica, debería ser una interpolación entre azul y vacío, el cual sería azul, con una opacidad menor a 1. Sin embargo, el rayo solo puede

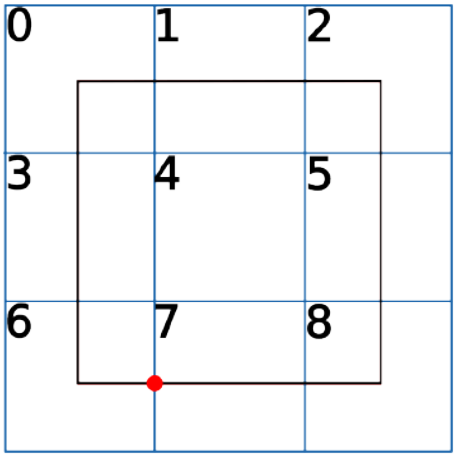


Figura 3.10: Muestreo interpolado.

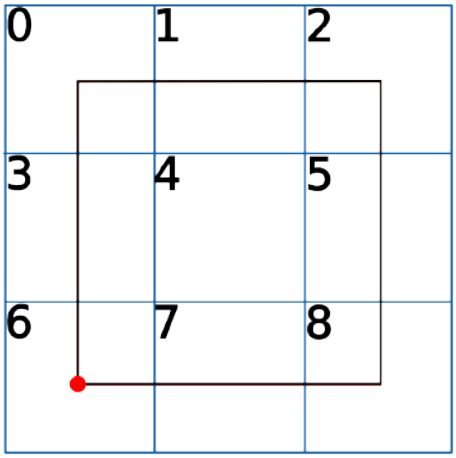


Figura 3.11: Muestreo del centro de un vóxel.

intersecar con nodos, no con *bricks*, por lo que la intersección es vacía. Pero eso es inconsistente, dado que ese vóxel tiene un valor, aunque no haya nodo allí. Si el nodo tuviese un vecino en X, el rayo intersecaría con el vecino, evitando el problema. Agregando un nodo en este espacio sin geometría se resuelve el problema.

En la Figura 3.13 se tiene el nodo frontera y su brick con sus vóxeles numerados, al lado del nodo original, que no tenía vecinos y el mismo rayo de la Figura 3.12. El vóxel 8 tiene color azul y opacidad 1, dado que los vóxeles compartidos

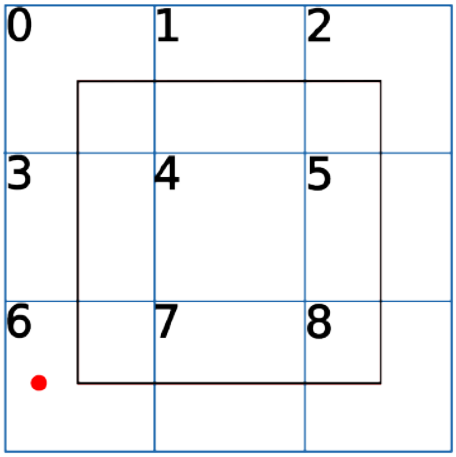


Figura 3.12: Muestreo con resultado vacío.

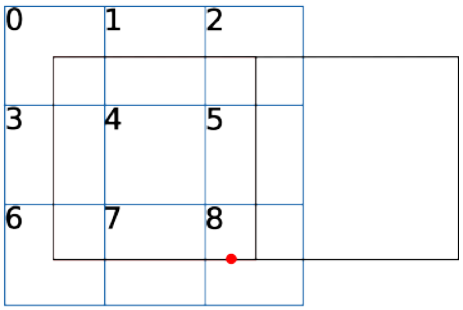


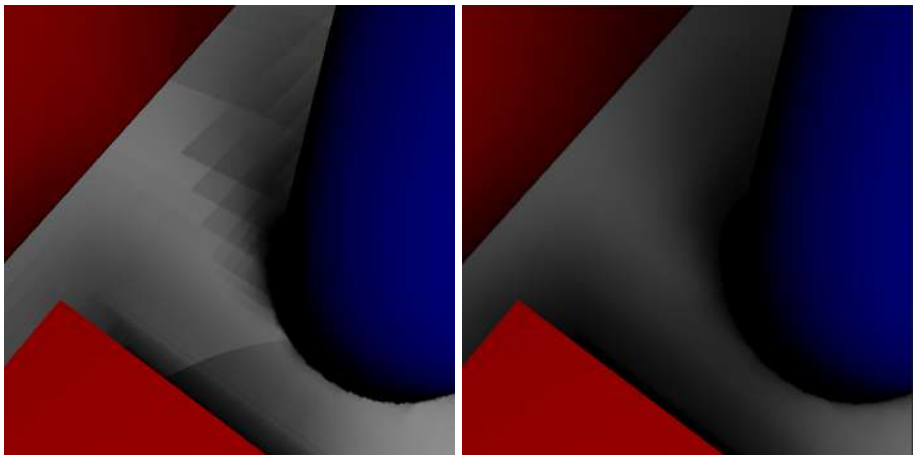
Figura 3.13: Muestreo con nodo frontera.

entre vecinos siempre deben tener el mismo valor, y la intersección del rayo con la estructura ya no va a ser vacía, llevando al resultado deseado del muestreo.

3.2.5. Filtrado

Una vez que todos los atributos se encuentran en las hojas del octree, los mismos serán filtrados a posiciones superiores. Filtrarlos implica promediarlos de tal manera que para un nodo interior (no hoja) A, su *brick* tenga el promedio de la información contenida en los bricks de todos sus hijos. El proceso se realiza en $n-1$ pasos, siendo n el nivel máximo del octree. En cada paso, se calcula el valor de cada vóxel del brick del padre, usando los bricks de los hijos.

Consideremos un nodo en el penúltimo nivel, con su brick asociado y sus hijos, como muestra la Figura 3.15. En la figura se muestran solo 4 hijos porque



(a) Sin nodos frontera. (b) Con nodos frontera.

Figura 3.14: Diferencia causada por nodos frontera.

se usa como ejemplo un *quadtree*, la versión 2D del *octree*, ya que es más fácil de visualizar. Cada hijo tiene a su vez su propio *brick* asociado como se muestra en la Figura 3.16.

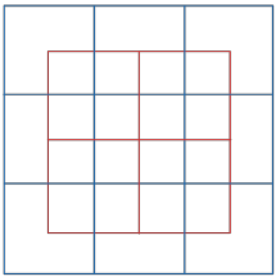


Figura 3.15: Nodo con su *brick* asociado y sus hijos.

Los valores de los vóxeles del brick padre se calculan en 4 etapas distintas, dependiendo de dónde se ubican en el *brick*: esquinas, bordes, caras, centro. Cada una de las etapas calcula un valor parcial para un tipo de vóxel. Estos valores son parciales, porque para los vóxeles limítrofes con otro nodo, estos deben luego ser agregados con los de los vecinos, con un tipo de *border_transfer*.

Dado el vóxel superior izquierdo de la Figura 3.18, se considera solo el brick del hijo superior izquierdo del nodo. De ese brick, se consideran los vóxeles amarillos en la figura. El valor final del vóxel del padre se calcula promediando los valores de los vóxeles del hijo, pesados por su porcentaje de solapamiento.

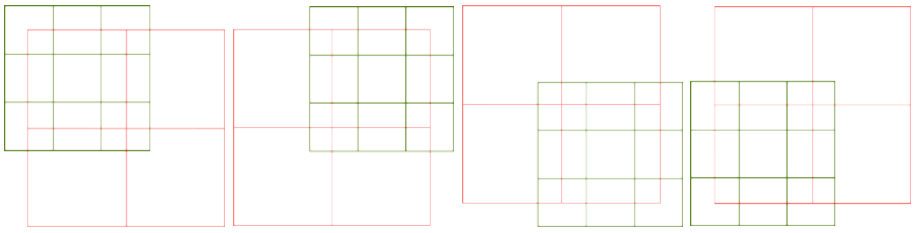


Figura 3.16: Bricks asociados a cada hijo del nodo.

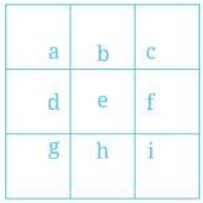


Figura 3.17: Una posible forma de referirse a cada vóxel de un brick.

Si nombramos los vóxeles del brick hijo $a, \cdots, i$ y los del brick padre $a', \cdots, i'$, como en la Figura 3.17, entonces el valor del vóxel del padre se calcula como:

$$a' = a + b * \frac{1}{2} + d * \frac{1}{2} + e * \frac{1}{4}$$

En el caso tridimensional, hay que agregar un quinto factor multiplicado por $\frac{1}{8}$.

De la misma manera se calculan los vóxeles de los bordes y de las caras, solo que en esos casos se usan más de un brick hijo, como se puede ver en las figuras

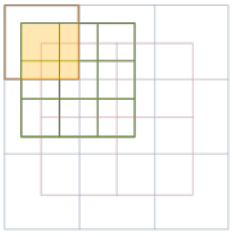


Figura 3.18: Filtrado para un vóxel esquina. Se puede ver el vóxel del brick padre cuyo valor se quiere calcular, junto con el brick del hijo y su solapamiento con este vóxel.

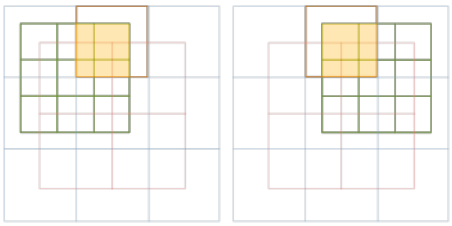


Figura 3.19: Filtrado para un vóxel borde.

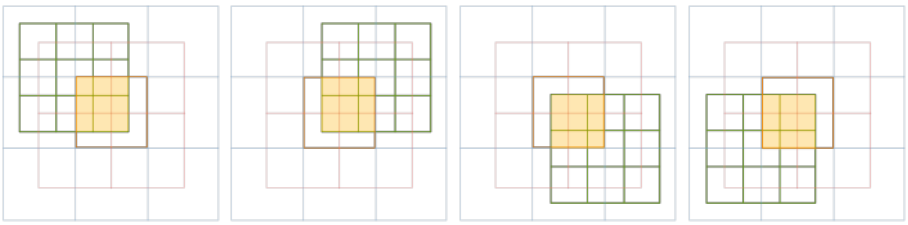


Figura 3.20: Filtrado para un vóxel cara.

3.19 y 3.20.

3.2.6. Filtrado anisotrópico

El filtrado descrito en la sección anterior resulta en vóxeles con valores independientes del punto de vista, o isotrópicos. Una característica deseable, es que los valores de oclusión y opacidad dependan del punto de vista del observador, lo que se logra, en este caso, guardando más de un valor por vóxel para estas propiedades. Esta acción resulta de utilidad a la hora de representar un atributo en una escena 3D.

Para ilustrar el punto anterior, consideremos una escena compuesta únicamente por una pared fina. Dado un vóxel de un nodo en un nivel alto del árbol, este nodo representa una gran región del espacio. La región contiene únicamente una pared que pasa por su centro, y el resto de la escena es espacio vacío. Con el filtrado presentado en las secciones anteriores, el vóxel tendrá un único valor de opacidad que, al representar un espacio mayormente vacío, tendrá un valor bajo. Sin embargo, se observa que la percepción de la pared es muy distinta si se la ve de frente o de costado. Como se muestra en la Figura 3.21, la pared vista de frente es opaca, pero vista de costado, su superficie visible es prácticamente nula, asemejándose a una superficie transparente.

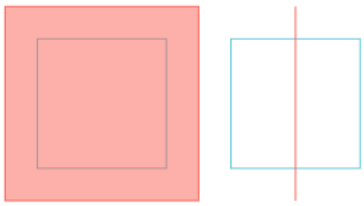


Figura 3.21: Vóxel que contiene una pared fina. En la izquierda, la pared se ve de frente. En la derecha, se ve de costado. Se espera que el valor del vóxel refleje esta diferencia entre las direcciones de vista.

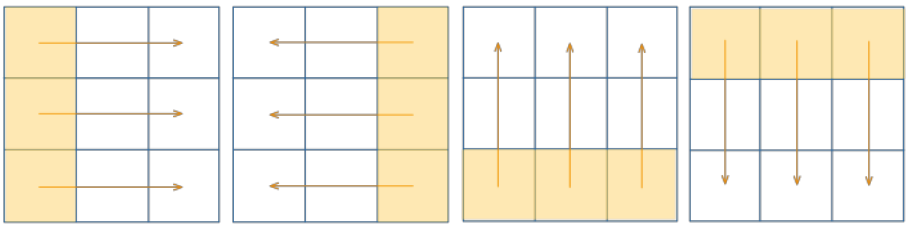


Figura 3.22: Filtrado anisotrópico en todas las direcciones.

La solución propuesta por Crassin [Cra+11] consiste en realizar el filtrado 6 veces por vóxel, uno por cada dirección alineada con los ejes: X, -X, Y, -Y, Z, -Z; y tener en cuenta la dirección a la hora de promediar los valores. Cada uno de los 6 valores representa el vóxel visto desde una de las 6 direcciones previamente mencionadas. Por lo tanto, si se observa el vóxel desde una dirección arbitraria, se calcula su oclusión y color a través de la interpolación de las tres direcciones más cercanas. Este tipo de filtrado se denomina **anisotrópico**, dado que depende de la dirección con que se observe al vóxel.

Dada una dirección, por ejemplo, de izquierda a derecha, se parte de los vóxeles de la izquierda y se calcula un valor para cada fila, partiendo de estos y yendo hacia los vóxeles de la derecha. Llamémosle al valor de cada fila **valor direccional**. En la Figura 3.22 se pueden ver todos los valores direccionales que deben ser calculados para un brick en 2D, para todas las direcciones. Para cada fila, se ejecuta un algoritmo de acumulación de opacidad que va avanzando en la dirección dada. Si el algoritmo llega a opacidad 1, termina y devuelve el valor direccional para esa fila.

El filtrado anisotrópico soluciona situaciones como la de la pared menciona-

da anteriormente. Para el caso de la pared fina, el vóxel que contiene la pared es opaco en la dirección paralela a la normal de la pared y prácticamente transparente en cualquiera de las perpendiculares.

3.3. Inyección de fotones

En las secciones anteriores se describió la construcción de la estructura y el filtrado de valores de color y opacidad sobre ella. Esta sección se enfoca en el proceso de almacenamiento de información luminosa. En esta etapa, se emiten fotones desde la fuente de luz de la escena, siguiendo un enfoque similar al de *photon mapping*. Para ello, se utiliza el ducto de rasterización.

Se rasteriza la escena desde el punto de vista de la luz para generar una textura 2D. En lugar de almacenar colores en cada téxel de la textura, se almacenan las posiciones de los objetos de la escena. La existencia de una posición en un téxel de la textura significa que esa posición es visible desde la luz, por lo que debe almacenar un fotón. Las posiciones son utilizadas para recorrer el octree y almacenar los fotones en vóxeles de sus hojas.

Los fotones que se almacenan en los vóxeles del árbol, conforman la **irradiancia**, el flujo radiante reflejado por cada superficie dependiendo de su área. Estos pasan por el mismo proceso de *border_transfer* y filtrado que el color. *Border_transfer* suma en lugar de promediar en este caso, dado que ambos lados de la frontera aportan a la cantidad de fotones total. El filtrado funciona de la misma manera.

La etapa de construcción debe realizarse solo una vez, mientras que, al soportar luces dinámicas, esta etapa debe ejecutarse cada vez que la luz se mueva. En esos casos, toda la irradiancia del árbol vuelve a cero y se vuelve a correr el programa que emite los fotones. La estructura se actualiza cada vez que la fuente luminosa se mueve.

Esta irradiancia debe ser muestreada para alcanzar los efectos de iluminación global deseados. Se muestrea mediante *cone tracing*.

3.4. *Cone tracing*

Como se comentó brevemente al inicio del capítulo, el trazado de conos se realiza en el *fragment shader* del ducto de rasterización. La entrada al algoritmo de *cone tracing* son los *geometry buffers* que contienen los valores de la escena, ya habiendo descartado los vértices fuera de vista. El algoritmo de trazado de

conos es ejecutado para cada píxel de los geometry buffers para calcular el color final.

Dado un punto de origen p, se lanza uno o varios conos con cierta dirección y apertura, dependiendo del efecto que se quiera lograr. Para cada cono, se parte desde su origen y se avanza en la dirección de su eje tomando pasos de cierto tamaño variable. Esto se conoce como *ray marching*.

El algoritmo se muestra a continuación:

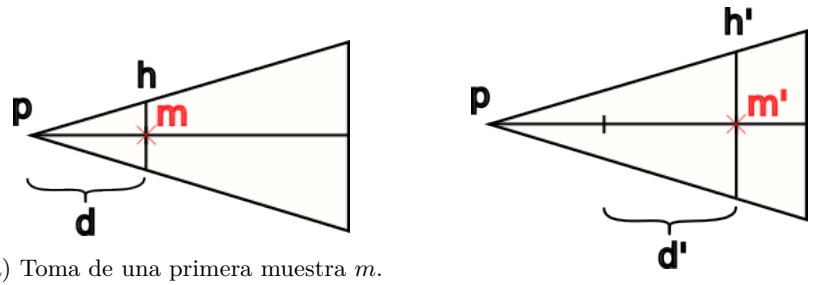
- Se toma un paso de tamaño d a lo largo del eje del cono y se consigue un nuevo punto $p + d$.
- Se calcula el diámetro del cono en ese punto, h.
- Se encuentra el nivel del octree i con el menor tamaño posible de vóxel que sea mayor al diámetro del cono h.
- Dado ese nivel i y la posición del punto $p + d$, se recorre el octree y se encuentra el nodo correspondiente a ese nivel que incluye el punto.
- Ese nodo tiene un brick asociado, cuyos vóxeles tienen los valores pre filtrados, conseguidos en 3.2.5.
- Se usa el valor del vóxel que contiene al punto $p + d$, este valor es una muestra m.

El proceso se repite a lo largo del cono, con un largo potencialmente diferente, consiguiendo nuevos puntos y nuevas muestras. Estas muestras se acumulan a lo largo del cono. En caso de vóxeles anisotrópicos, también depende de la dirección del eje del cono. Luego, se sigue avanzando paso a paso acumulando valores hasta satisfacer un criterio de parada, que puede ser llegar a un máximo valor acumulado, o haber recorrido una distancia máxima a lo largo del eje del cono.

Este proceso de toma de muestras a lo largo del cono se puede observar en la Figura 3.23.

Para calcular luz indirecta, las muestras son un color c y una opacidad α. Si en cada paso consideramos c y α como los valores hasta el momento, y c' y α' como los valores de la nueva muestra m', entonces en cada paso los valores de c y α se calculan de la siguiente manera ([Cra+11]):

$$\begin{cases} c = \alpha c + (1 - \alpha)\alpha' c' \\ \alpha = \alpha + (1 - \alpha)\alpha' \end{cases}$$



(a) Toma de una primera muestra m.

(b) Toma de una segunda muestra m'.

Figura 3.23: Toma de muestras a lo largo del cono en *cone tracing*.

Para la luz indirecta difusa, se lanzan conos para cubrir el hemisferio centrado en la normal del punto, como se puede ver en la Figura 3.24. En la mayoría de los casos, 5 conos anchos difusos dan un buen resultado. Cada cono acumula el color de los vóxeles con los que se encuentra, multiplicado por la cantidad de fotones, que fue almacenada en el paso de inyección de fotones (3.3). Esto logra un efecto de *color bleeding*, donde las superficies adquieren color de otras superficies cercanas que reciben y dispersan luz.

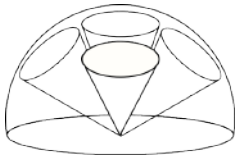


Figura 3.24: Conos intentando cubrir el hemisferio en dirección de n, centrado en p.

Para la luz indirecta especular, se lanza un solo cono fino en la dirección de reflexión. El cono, al ser más fino, es rápidamente ocluido por nodos de niveles más bajos, con lo que el reflejo tiene mejor definición. Si se utiliza un mayor ángulo de apertura del cono, el reflejo se ve más turbio, simulando una superficie menos pulida.

3.5. Oclusión ambiental

La oclusión ambiental es una técnica de renderizado que se usa para calcular qué tan expuesto está cada punto de una escena a la luz ambiental. *Cone tracing* se puede usar para calcular este valor. El efecto no aporta al realismo de una

escena una vez que se usan técnicas de iluminación indirecta, pero es un buen paso previo para ver el funcionamiento del algoritmo.

Para calcularlo, se lanzan varios conos, cubriendo el hemisferio centrado en la normal de la superficie en el punto. El único valor necesario es la opacidad. A medida que se viaja a lo largo de un cono, se va acumulando la opacidad de los vóxeles correspondientes. Se define una distancia máxima y el criterio de parada es cuando el punto a lo largo del cono pasa esa distancia máxima, o la oclusión llega a 1.

3.6. Conos de sombra

De la misma manera que el trazado de rayos logra sombras lanzando un rayo hacia la fuente de luz, *cone tracing* lo logra lanzando un cono hacia la fuente de luz. El cono toma en cuenta únicamente la opacidad y su criterio de parada es o alcanzar la luz o llegar a 1 de opacidad acumulada, lo que pase primero. El beneficio de que sea un cono en lugar de un rayo, como se vio en la Sección 2.6, es que se logran sombras suaves, sin necesidad de lanzar varios y promediar sus resultados.

Capítulo 4

Implementación

La primera decisión importante en el proceso de desarrollo fue implementar el algoritmo en la GPU. La principal razón para esto, es el alto grado de paralelismo que la misma ofrece. A su vez, el ducto de rasterización, ampliamente implementado y optimizado en las GPUs, puede ser utilizado, aprovechando así algoritmos y cálculos optimizados a la hora de generar una imagen.

La programación en GPU precisa un lenguaje para la **CPU**, una **API de gráficos** y un lenguaje de **sombreado**. El lenguaje de CPU es el que realiza y coordina las llamadas a funcionalidades de la GPU. La API de gráficos es la que provee la interfaz que utiliza el lenguaje de CPU para comunicarse con la GPU. La misma es una especificación que los fabricantes de las tarjetas de video deben implementar si deciden soportarla. El lenguaje de sombreado es el que se utiliza para escribir los *shaders*, programas que ejecutan directo en la GPU y hacen uso del paralelismo de la misma.

Como lenguaje de CPU se eligió **Rust**, un lenguaje de sistemas moderno multiparadigma. Fue escogido debido a su gran comunidad, su amplia documentación y su poderoso manejador de paquetes *cargo*. Se caracteriza por ser eficiente, al permitir un acceso a primitivas de bajo nivel, pero manteniendo una buena experiencia de desarrollo, debido a las abstracciones de costo cero que provee. Otra característica para mencionar, es la seguridad de memoria que impide comportamientos indefinidos en tiempo de ejecución, como punteros nulos en situaciones que se espera un valor, o accesos a espacios de memoria no inicializados o liberados.

También se consideró el lenguaje C++ para CPU, dado que es el lenguaje más popular para aplicaciones gráficas. Si bien ambos lenguajes presentan una eficiencia similar, el factor que más pesó en la decisión fue la presencia de un

manejador de paquetes en Rust. El mismo permitió instalar varias dependencias más rápido y cambiarlas a lo largo del ciclo de desarrollo cuando fue necesario. Dada la implementación en la GPU, la eficiencia y el manejo de memoria fue secundario.

Como API de gráficos se eligió **OpenGL**, junto con el lenguaje de sombreado **GLSL**, el más usado para OpenGL, si bien soporta otros lenguajes. También fueron consideradas CUDA y Vulkan, pero se terminó por escoger OpenGL debido a la facilidad de desarrollo, el conocimiento previo del equipo y la facilidad de trabajo con *compute shaders*. Si bien Vulkan es una API más moderna, es conocida por ser más compleja que OpenGL y el equipo del trabajo no contaba con la suficiente experiencia para utilizarlo adecuadamente. CUDA suele usarse para cómputo de propósito general en la GPU, sin embargo, no posee ducto de rasterización, el cual fue ampliamente utilizado. Por lo tanto, se optó por utilizar los *compute shaders* de OpenGL para el cómputo de propósito general necesario.

El desarrolló se realizó en el sistema operativo **Linux**, debido a los ambientes de desarrollo utilizados. De igual manera, tanto Rust como OpenGL son multiplataforma, con lo que la aplicación es fácilmente portable a otros sistemas operativos.

La arquitectura de la aplicación consta de tres paquetes: *CLI*, *Core* y *Engine*. *Engine* contiene todas las abstracciones sobre OpenGL utilizadas, provee tipos como *Transform*, *Light*, *Camera*, comunes en aplicaciones interactivas, que permiten manipular objetos en el espacio 3D. *Core* contiene todas las etapas y programas del algoritmo que han sido mencionados: voxelización, construcción del *octree*, filtrado, actualización y el trazado de conos en sí. El paquete *CLI* (*Command-Line Interface*, interfaz por línea de comandos) es el punto de entrada de la aplicación, procesa los argumentos pasados por línea de comandos y archivos de configuración y utiliza las funcionalidades expuestas por *engine* y *core* para crear un ambiente 3D y ejecutar el algoritmo. La arquitectura se muestra en la Figura 4.1.

En las siguientes secciones se verán más a detalle cada uno de estos paquetes.

4.1. *Engine*

Engine es el paquete en el que se implementaron las abstracciones usuales al trabajar con API de gráficos, que son utilizadas por el resto de la aplicación. Se pueden ver con sus relaciones en la Figura 4.2.

La abstracción principal es la escena (*Scene*). Una escena consta de una luz

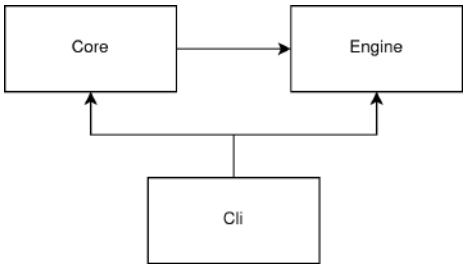


Figura 4.1: Arquitectura alto nivel de la aplicación.

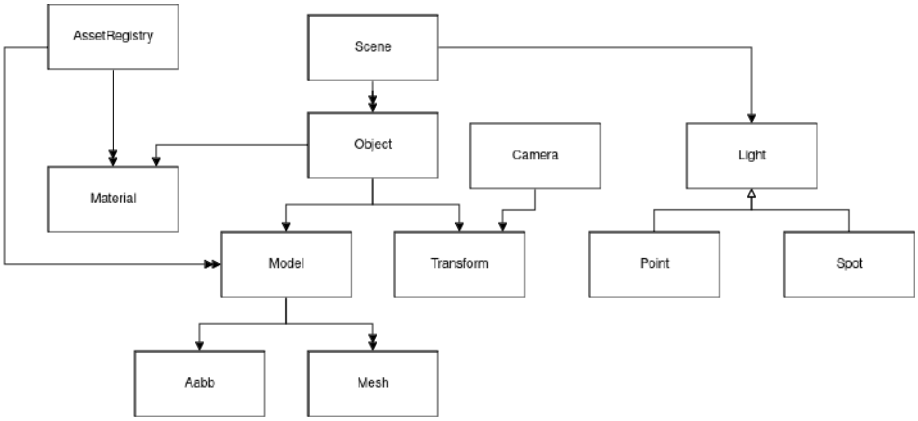


Figura 4.2: Arquitectura de *Engine*.

(*Light*) y de muchos objetos (*Object*). Es la representación del mundo tridimensional en el que se encuentra todo lo visible de la aplicación.

Cada objeto de la escena tiene un material (*Material*), un modelo (*Model*) y un *Transform*.

Transform es un tipo que contiene la posición, rotación y escala de un objeto en la escena. Esto simplifica el lidiar con matrices de traslación, rotación y escala a lo largo de todo el programa.

Tanto los modelos como los materiales son cargados una vez al inicio de la aplicación en el *AssetRegistry*, para no duplicarlos en caso de que sean utilizados por más de un objeto. Los objetos solo necesitan almacenar referencias a estos.

Se representan los modelos como mallas poligonales, distinto al trazado de rayos en el que se usan ecuaciones geométricas. Para cargar estos modelos, se utilizó la librería *tobj* [Ush22], que permite cargar archivos con extensión *obj*. Cada *Model* contiene muchos *Mesh* y tiene un *Aabb*, un Axis-Aligned Bounding Box, que se calcula a partir de cada uno de los vértices del mismo. Este volumen

acotante se calcula en el momento que se carga el modelo y se expone para ser utilizado por el resto de la aplicación.

Camera provee el punto de vista, la dirección de vista, la dirección hacia arriba, la ventana de vista, entre otros, del que se renderiza toda la escena. Se soportan tanto cámaras en perspectiva, como ortogonales.

Para las luces, se soportan tanto luces direccionales como puntuales. Estas luces tienen toda la lógica necesaria para que luego *core* realice la inyección de fotones.

La estructura de árbol, los bricks, y todas las estructuras auxiliares, se almacenan en la memoria de la GPU. Para esto, se ofrecen abstracciones sobre los distintos tipos de memorias y texturas de la GPU. *TextureBuffer*, *Texture2D* y *Texture3D* son ejemplos de estas, que manejan memoria lineal, bidimensional y tridimensional respectivamente. Se provee la abstracción *Shader* para interactuar con la GPU mediante programas escritos en GLSL.

Finalmente, se exponen las primitivas necesarias para crear una interfaz de usuario. Luego, estas son usadas por *core* para modificar parámetros del algoritmo.

4.2. Core

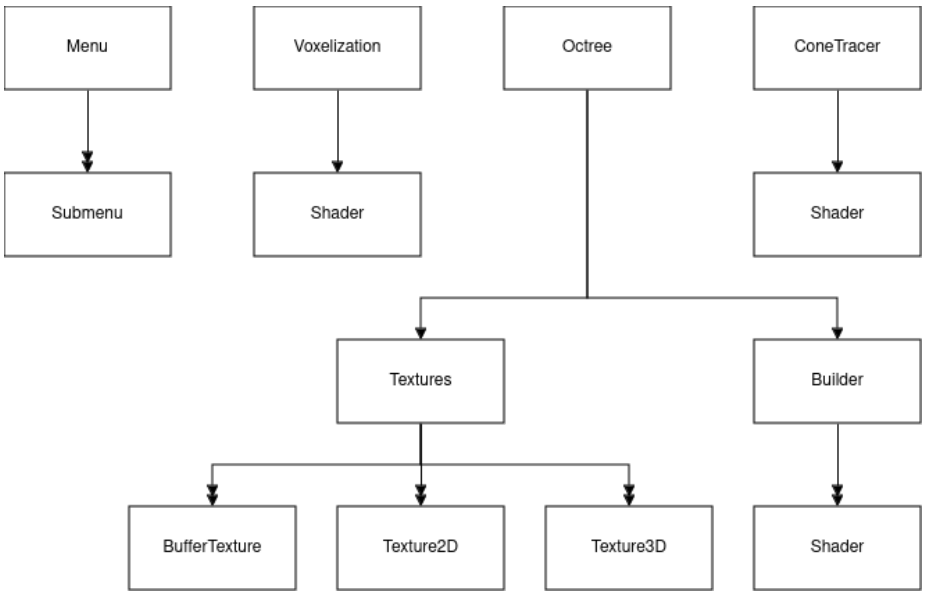


Figura 4.3: Arquitectura de *Core*.

Core es el corazón de la implementación, donde se implementa el algoritmo. Contiene la lógica de la voxelización, toda la implementación del *octree*, el trazado de conos y un menú para poder ajustar parámetros en tiempo de ejecución. Debido a que el algoritmo está implementado en la GPU, este paquete hace mucho uso de los *Shaders*. Sus componentes se pueden ver en la Figura 4.3.

4.2.1. Etapas del algoritmo

En la Figura 4.3 se pueden ver los componentes encargados de cada etapa del algoritmo.

La voxelización tiene su propio módulo que hace uso del ducto de rasterización, como se vio en 3.1. Para voxelizar la escena, ésta primero debe ser normalizada usando el *Aabb* expuesto por *Engine*. Se crea un *Aabb* para la escena, y se le aplican transformaciones de escalado y translación de manera que sea lo más grande posible, pero que, sin embargo, quede incluida dentro de la grilla de vóxeles. Las mismas transformaciones luego se aplican a los modelos al momento de voxelizar, asegurando así que todo objeto quede dentro de la grilla, y que se mantengan las proporciones.

La abstracción de *Octree* realiza tanto construcción como el filtrado de los valores de la escena a lo largo de él. Guarda referencias a todas las texturas utilizadas y a todos los *Shaders* que operan sobre esas texturas. También guarda una referencia a la lista de vóxeles generada por el módulo anterior.

El *ConeTracer* reúne todos los conceptos anteriores e implementa el algoritmo de trazado de conos en el ducto de rasterizado, donde se genera la imagen final.

4.2.2. Representación del *octree*

La estructura del *octree*, cada nodo y sus hijos, se representa en la GPU con una textura lineal. Esta textura se llama *node pool*. Cada téxel (elemento de textura) de esta textura es un puntero a otro nodo. Se toma la convención de que cada grupo de 8 téxeles es un nodo, donde cada téxel contiene un puntero al hijo correspondiente. Los primeros 4 téxeles representan los hijos con valor de $z = 0$ mientras que los últimos 4 representan los que tienen valor de $z = 1$. De manera similar de cada grupo de 4, los primeros 2 son los hijos con valor de $y = 0$ menor y los otros dos $y = 1$. Por último, de cada uno de los 4 grupos de 2, el primer téxel representa al hijo con coordenada $x = 0$ y el último con coordenada $x = 1$. Si un téxel tiene el valor 0, entonces ese hijo del nodo representa espacio vacio, y ese nodo no será guardado en la *node pool*. Si un téxel tiene un valor

$n \neq 0$, entonces en la posición de memoria $n * 8$ comienza ese nodo, que termina en la posición de memoria $x * 8 + 7$.

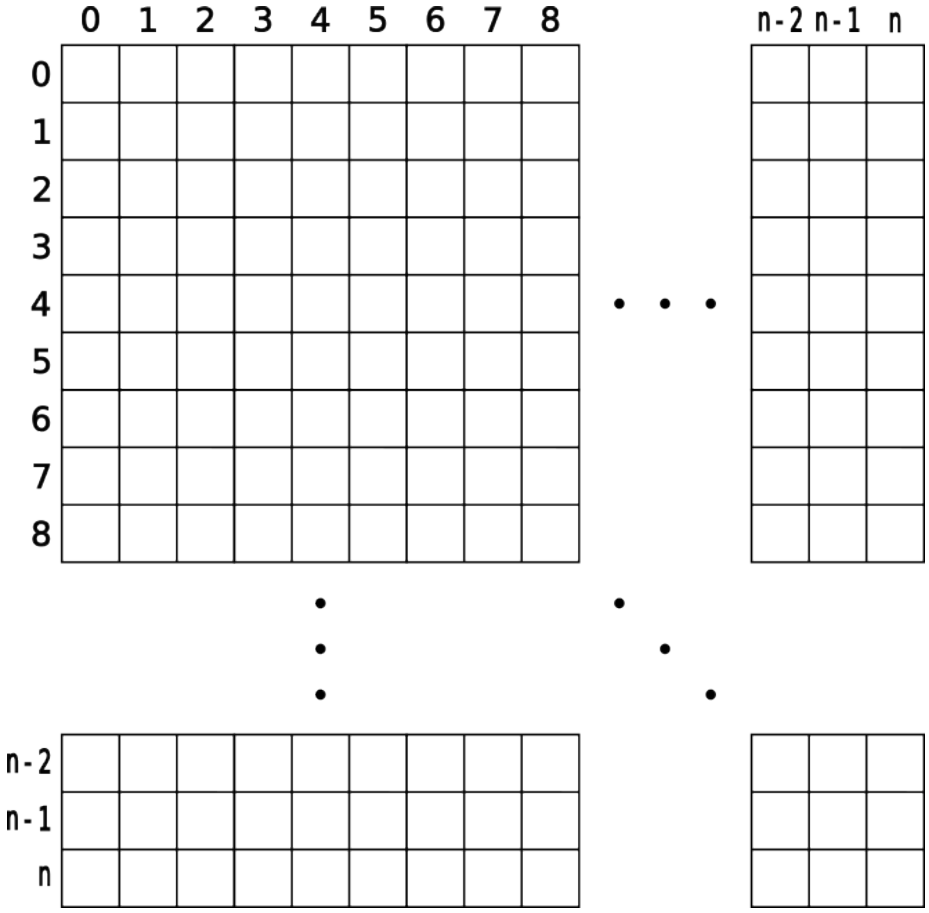


Figura 4.4: Ejemplo de *brick pool* (en 2D), con índices de memoria. El verdadero es 3D.

Para representar los *bricks*, se usa una gran textura 3D, llamada la *brick pool*. Cada brick es una sección de 3^3 téxeles de esta textura 3D. En cada uno de estos téxeles se almacenan valores de la escena, por ejemplo, el color. Para otros valores que deben ser almacenados, como la irradiancia, se crea otra *brick pool*. Cada téxel dentro de un brick se llama vóxel, porque además de ser un píxel de textura, también es un píxel de volumen, a los efectos de la aplicación. En la Figura 4.4 se muestra una *brick pool*, con una textura 2D para facilitar la visualización, donde cada téxel está identificado por sus coordenadas x e y (y z

en su versión 3D).

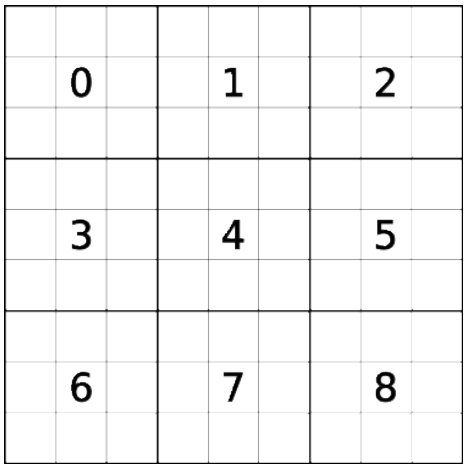


Figura 4.5: Ejemplo de bricks, cada uno con un identificador único que se asocia a un nodo.

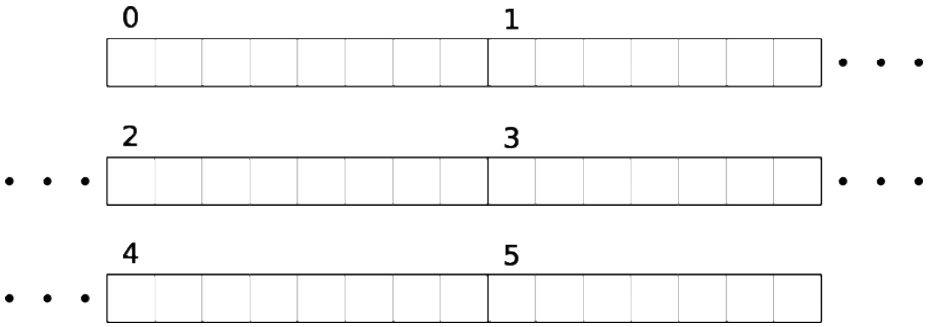


Figura 4.6: Ejemplo de nodos, cada uno con un identificador único.

Cada nodo tiene asociado un brick, ambos identificados de forma única por un mismo índice, como se puede ver en las figuras 4.5 y 4.6 respectivamente. Dado que los bricks existen en una textura 3D, la manera de localizarlo en memoria es con un vector en $\mathbb{N}^3$. Si se quiere encontrar el brick correspondiente a un nodo dado su identificador, se usa una función que convierte el índice del nodo en un vector en $\mathbb{N}^3$. El vector de $\mathbb{N}^3$ (n, m, s) es el índice del primer vóxel del brick buscado. El resto del *brick* se encuentra en las posiciones desde (n, m, s) hasta $(n + 2, m + 2, s + 2)$.

En la Figura 4.7 se muestra un ejemplo de nodos, con sus bricks asociados. Además, cada nodo contiene 8 téxeles, los cuales representan los hijos del nodo,

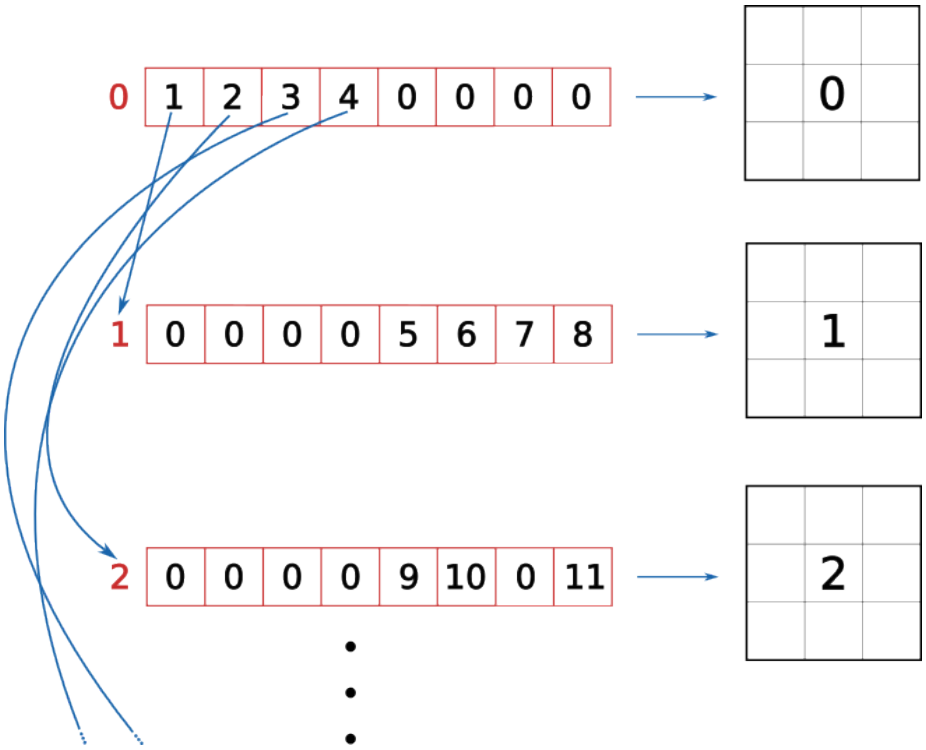


Figura 4.7: Ejemplo node pool y brick pool.

donde el valor de cada téxel es el identificador de un nodo.

Ya que el árbol es disperso, se necesita un valor que represente que un hijo no contiene geometría, es decir, que represente espacio vacío. Se usa el valor 0. Cada téxel apunta a un nodo mediante su índice en la *node pool*. En la figura se muestran estos índices dentro de cada téxel.

Se usa el índice del nodo para identificar su *brick*, que es parte de una textura 3D. Cada brick se muestra al costado de su nodo asociado, con sus coordenadas dentro de la textura en el margen derecho. Cada téxel individual de un brick tiene sus propias coordenadas, como es el caso con los téxeles individuales de la *node pool*.

Las propiedades de la escena, ya sea color o irradiancia, se almacenan en los *bricks*. Existe una función que lleva posiciones dentro del nodo, que representa una sección de la escena, a posiciones dentro de su brick asociado. En la Figura 3.5 se vé por qué es necesario, las esquinas del nodo se mapean a los centros de los vóxeles del brick. A la hora de tomar una muestra de una propiedad en un punto de la escena, se ubica el nodo correspondiente, se aplica la función

y se toma el valor de la propiedad en el *brick*. Si el punto no es el centro de uno de los vóxeles del brick, se debe interpolar el valor utilizando los vóxeles adyacentes. Almacenar los bricks en una textura 3D en lugar de en una textura lineal, trae beneficios de rendimiento, ya que las GPU proveen interpolación trilineal acelerada por hardware, lo que elimina la necesidad de implementarla, y se obtiene mayor rendimiento.

4.2.3. Renderizado diferido

Para renderizar la escena, se utiliza el renderizado diferido.

A la hora de renderizar una escena, hay dos grandes modelos que se pueden utilizar: el clásico, conocido como *forward rendering* y una opción alternativa, conocida como renderizado diferido.

En el primero, se procesan todos los vértices en el programa. Cada uno pasa por cada etapa del ducto gráfico y aporta a la imagen final a menos que sea desechado por una prueba de profundidad. Cuando un píxel genera varios fragmentos, y se deben correr cálculos pesados por fragmento, se puede estar realizando trabajo innecesario, debido a que, en el espacio 3D de la escena, los fragmentos pueden estar a distinta profundidad y solo el más cercano es el que se debe procesar. Dados dos fragmentos que podrían darle color a un mismo píxel, una prueba de profundidad descartará al que se encuentre detrás del otro, a menos que presente opacidad menor a 1.

En el renderizado diferido, se procesan todos los vértices del programa, pero se saltean cálculos pesados en el *fragment shader*. Se guarda toda la información necesaria para etapas posteriores en texturas llamadas *geometry buffers*, datos como posición, normal, color y cualquier otro dato relevante de la geometría a la hora de realizar calculos pesados de sombreado. Se saltean los cálculos para objetos fuera del campo de visión y detrás de otros objetos.

El *forward rendering* es conceptualmente más sencillo y fácil de implementar. En escenas con pocos objetos y fuentes de luz, o con cálculos simples de iluminación, la complejidad extra del renderizado diferido no suele estar justificada dado que el aumento de rendimiento es despreciable. A su vez, el *forward rendering* soporta mejor la opacidad. Sin embargo, a medida que la complejidad de la escena y los métodos de sombreado aumenta, el renderizado diferido se vuelve una mejor opción para aumentar el rendimiento. También, el renderizado diferido facilita ciertas técnicas de postprocesamiento de la imagen, como *bloom*, *HDR* (*High Dynamic Range*), corrección gamma, y normalización, entre otras.

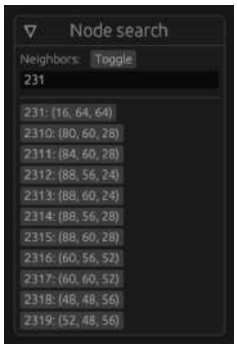


Figura 4.8: Menú de nodos.

4.2.4. Menú

A lo largo de la implementación, fue necesario depurar varios errores y correr pruebas. Para esto, fue muy útil contar con una interfaz gráfica o menú para seleccionar varias opciones y poder ver valores de la GPU en tiempo real. Se desarrolló este menú utilizando un paquete del ecosistema de Rust llamado *Egui* [Ern20].

Egui, permite rápidamente crear una interfaz gráfica basada en ventanas que se renderiza junto con la aplicación en cada frame. Es muy sencillo conectar valores del código a etiquetas en el menú y botones en el menú a acciones.

El menú de la aplicación cuenta con varias ventanas, o submenús, para ver valores, ajustar parámetros, y renderizar distintas imágenes. Uno de submenús para depurar muestra todos los nodos de la *node pool*, permite buscarlos por índice y coordenadas, y visualizarlos en el espacio.

Esta se puede ver en la Figura 4.8. En el menú se muestran todos los nodos con su índice en el buffer y sus coordenadas dentro de la escena, entre 0 y la cantidad de vóxeles por dimensión, 512 o 1024. Al apretar cualquier nodo, se muestra en la escena un cubo delimitando la región de la escena representada por ese nodo. Se pueden mostrar muchos nodos a la vez.

También se usó la interfaz gráfica para reportar los FPS que fueron usados en el capítulo 5.

4.3. CLI

CLI (*Command-Line Interface*, interfaz por línea de comandos), es el punto de entrada de la aplicación. Consta de un archivo *main* que inicializa el contex-

to de OpenGL, la ventana de la aplicación, y utiliza *engine* y *core* para crear la escena con iluminación global. También procesa varios tipos de archivos de configuración, que serán explicados a continuación. Todos estos tipos de archivos contienen información en formato RON, por *Rusty Object Notation*, una notación similar a JSON, *JavaScript Object Notation*, pero diseñada para Rust.

4.3.1. Archivo de configuración

Cada ejecución de la aplicación carga un archivo de configuración que se encarga de definir ciertos parámetros. Estos son la cantidad de vóxeles que se utilizarán, 256, 512 o 1024; las dimensiones de la pantalla, entre otros. A partir de esto, se inicializan otras variables, como la cantidad de niveles del octree, que es definida por la cantidad de vóxeles utilizados. Estos parámetros son utilizados a lo largo de toda la aplicación, por lo que se usó el patrón singleton, creando un tipo *Config*, que es inicializado una vez por *CLI* y luego utilizado en el resto de la aplicación.

4.3.2. Archivos de escena

Para poder fácilmente cargar distintos modelos y probar el algoritmo en ellos, se creó un formato de archivos de escena.

En estos archivos se definen la lista de objetos y luces de la escena. También se especifican listas de recursos para que los objetos referencien, modelos y materiales. Estos recursos son cargados primero y los objetos pueden reutilizarlos sin necesidad de copiarlos.

Utilizando estos archivos, se pueden definir muchas escenas distintas para probar la implementación.

4.3.3. Archivos de valores predeterminados

Para poder iterar más rápido, se crearon archivos de valores predeterminados. Estos archivos contienen valores predeterminados de opciones que cambian con el transcurso de la ejecución. Por ejemplo, la posición de la cámara, qué tipo de imagen se está renderizando y qué nodos están siendo visualizados. Estos archivos también pueden guardarse a partir del menú.

Al iniciar el programa, se puede especificar un archivo de valores predeterminados, que altera el estado inicial de la escena. Son muy útiles cuando se está investigando algo en específico o viendo una imagen desde un punto de vista

particular. Es posible guardar los valores utilizados, cambiar algo en el código, recompilar y observar cómo ese cambio afectó lo que se estaba observando.

4.4. Limitaciones

Al implementar el algoritmo, se pudieron observar algunas limitaciones inherentes al uso de vóxeles.

Debido a que el algoritmo simula únicamente un rebote de la luz, la luz indirecta debería estar presente únicamente en zonas cercanas a las iluminadas directamente. Excepto que le llegue el reflejo de alguno otra superficie, no debería haber luz indirecta en las mismas zonas donde hay luz directa. Sin embargo, existen situaciones en las que esto sucede, como por ejemplo en la de la Figura 4.9. En esta, se puede observar que la zona iluminada directamente también presenta un fuerte componente luz indirecta.

La Figura 4.10 muestra un diagrama para ayudar a explicar este fenómeno. En la derecha de la imagen hay una pared roja, rodeada de espacio vacío. A la izquierda de la pared se muestran vóxeles de tamaños cada vez mayores y color cada vez más transparente. Al trazar un cono desde la pared para calcular la luz indirecta sobre la misma, éste terminará muestreando varias veces el mismo color que la pared. Al no recibir luz que reboto de ninguna otra superficie, se puede observar como la luz indirecta sobre la pared acaba incluyendo el rebote de luz de la pared misma, por lo que la luz directa termina afectando dos veces.

(a) Solo luz directa. (b) Solo luz indirecta.

Figura 4.9: Luz indirecta incluye la directa.

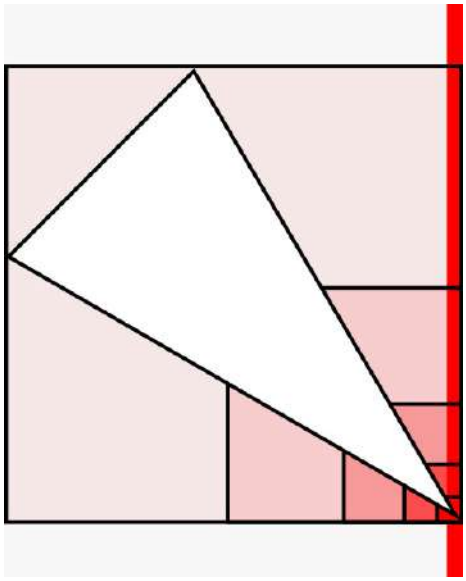


Figura 4.10: Cono muestreando el mismo color de la pared.

Otra limitación se observa en la Figura 4.11, donde se muestra la presencia de luz indirecta detrás de un estandarte. En un escenario real, la luz no debería rebotar detrás del estandarte, sino únicamente en el frente. Dado que no se maneja refracción, luz ubicada al frente del estandarte no debería ser tomada por la pared detrás del mismo. Sin embargo, esto ocurre porque la superficie del estandarte es muy delgada, y la única capa de vóxeles que lo representan abarcan tanto el lado frontal como el posterior. Este problema es resuelto agregando una mayor resolución, ya que esto genera dos capas de vóxeles para los estandartes, por lo que a la pared no le afecta la luz reflejada la cara frontal del estandarte.

(a) Luz indirecta detrás de un estandarte (costado).

(b) Luz indirecta detrás de un estandarte (frente).

Figura 4.11: Luz indirecta incluye la directa.

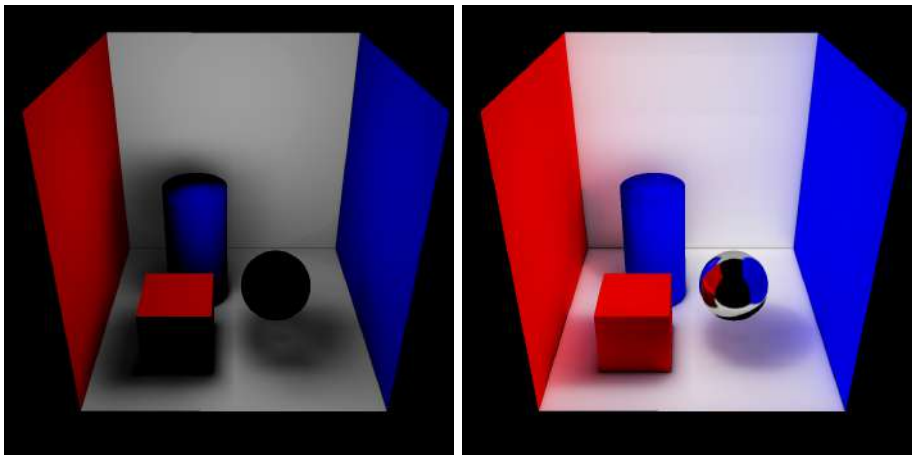
Capítulo 5

Experimentación

Para analizar el rendimiento de la implementación, se realizaron experimentos en distintas tarjetas gráficas, las cuales se ven en el Cuadro 5.1. Estas, $H1$, $H2$ y $H3$, corresponden a hardware con capacidades gráficas progresivamente superiores. Las escenas utilizadas se muestran en las figuras 5.1 y 5.2, que llamaremos $S1$ y $S2$ respectivamente. Se puede observar en cada una de ellas la luz indirecta difusa, luz indirecta especular y sombras suaves.

Nombre	**GPU**	**Núcleos**	**Clock (GHz)**	**VRAM (GB)**
$H1$	Intel Mesa ADL GT2	96	1.45	*
$H2$	Nvidia GTX 1660 Ti mobile	1536	1.45	6
$H3$	Nvidia Geforce RTX 4070	5888	1.92	12

Cuadro 5.1: Hardware utilizado. * al ser una tarjeta integrada, no tiene memoria gráfica dedicada.



(a) Solo luz directa. (b) Luz directa e indirecta.

Figura 5.1: Escena de prueba con geometría simple.

(a) Solo luz directa. (b) Luz directa e indirecta.

Figura 5.2: Sponza.

Los experimentos varían la cantidad de vóxeles por dimensión, y registran los cuadros por segundo alcanzados (FPS, por sus siglas en inglés) y el tiempo de construcción del *octree* en segundos. Para conseguir los FPS se ejecutó el programa durante un minuto, tomando una muestra cada segundo, luego se promediaron. Para el tiempo de construcción del *octree*, se construyó 50 veces y se calculó el tiempo promedio. Cada ejecución se realizó independientemente,

para evitar posibles mejoras debido al uso del caché.

En el Cuadro 5.2 se muestran los resultados de estos experimentos en los 3 hardwares utilizados ($H1$, $H2$ y $H3$) descritos en el Cuadro 5.1. Se muestran los resultados para cada una de las escenas $S1$ y $S2$, en cada uno de los hardwares, y para cada nivel de resolución (vóxeles por dimensión).

5.1. Análisis de resultados

Una primera observación es que los cuadros por segundo se encuentran cerca del tiempo real. Se nota que en $H1$ los FPS nunca superan los 20, mientras que en $H3$ nunca bajan de 140. $H2$ representa un término medio, logrando más de 60 FPS en la escena simple ($S1$) y mostrando una gran variedad de valores en la escena compleja ($S2$) para cada resolución utilizada (256, 512, 1024).

Se observa que, como es de esperarse, a mayor resolución (vóxeles por dimensión), los cuadros por segundo disminuyen. Esto se debe a que una resolución más alta mejora la aproximación y genera imágenes de mayor calidad, pero a costa de mayor carga computacional.

Un aspecto que destaca especialmente es el tiempo de construcción del octree, que permanece alrededor de los 2 segundos, cuando idealmente debería estar en el rango de los milisegundos. Dado que este tiempo es prácticamente igual tanto en $H1$ como en $H3$, parece evidente que el cuello de botella no es la GPU en sí, sino la comunicación entre GPU y CPU.

Escena	**Hardware**	**Vóxeles**	**FPS**	**Construcción del *octree* (s)**
$S1$	$H1$	256	18,22	1,76
		512	14,77	1,82
		1024	12,13	2,01
	$H2$	256	136,57	1,78
		512	108,67	1,80
		1024	60,24	1,89
	$H3$	256	141,57	1,88
		512	141,47	1,90
		1024	140,88	1,89
$S2$	$H1$	256	7,30	1,84
		512	4,29	1,86
		1024	2,84	2,07
	$H2$	256	59,68	1,82
		512	37,42	1,94
		1024	9,83	1,83
	$H3$	256	141,27	1,70
		512	141,51	1,91
		1024	141,21	1,99

Cuadro 5.2: FPS y tiempo de construcción del octree para cada escena.

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajo Futuro

En este proyecto se logró una implementación práctica y funcional de la información provista por un artículo de revista [Cra+11] y una tesis [Cra+09]. El objetivo principal fue estudiar y comprender a profundidad el algoritmo de Voxel Cone Tracing, enfrentando los retos de llevarlo a un entorno funcional, documentando el proceso de manera que sirva como recurso útil para otros interesados en este tema. Así, se cumplieron los objetivos principales planteados al inicio del trabajo.

6.1. Principales conclusiones

Se consiguió implementar el algoritmo de Voxel Cone Tracing.

Con el mismo se logró generar un rendering, en el hardware intermedio probado y en una escena compleja, con valores de cuadros por segundo cercanos al tiempo real.

A lo largo del proyecto, se profundizó en el entendimiento del algoritmo y en los desafíos del desarrollo en GPU. Se dejó un recurso, detallando el algoritmo paso a paso, y el código queda abierto como ejemplo para futuros desarrolladores.

Este proyecto no solo permitió desarrollar un código concreto, sino que también sirvió como ejercicio para materializar conceptos teóricos en aplicaciones reales.

El desarrollo del proyecto presentó diversos desafíos. Programar en la GPU

implicó un cambio de paradigma respecto al modelo tradicional en CPU. Las restricciones arquitectónicas y el diseño del pipeline de cómputo representaron una curva de aprendizaje significativa. La depuración en GPU, limitada por la falta de herramientas tradicionales, requirió el desarrollo de utilidades personalizadas para visualizar los estados intermedios del algoritmo y diagnosticar problemas.

6.2. Trabajo futuro

El proyecto presenta varias oportunidades para mejorar y ampliar la implementación actual:

- Soporte para objetos dinámicos: Implementar el manejo de objetos dinámicos en la escena y actualizar el octree en tiempo real, una característica considerada pero no incluida en este trabajo.
- Migración a Vulkan: Portar la implementación a Vulkan para aprovechar un control más detallado de la GPU, potencialmente mejorando el rendimiento y la flexibilidad.
- Mejora de herramientas de visualización: Desarrollar herramientas más avanzadas para inspeccionar los estados intermedios del algoritmo, facilitando la depuración y la investigación.

Los resultados y experiencias obtenidos proporcionan una base sólida para futuros desarrollos de Voxel Cone Tracing y otras técnicas de iluminación global.

Bibliografía

[Ake+18] Tomas Akenine-Möller, Eric Haines, Naty Hoffman, Angelo Pesce, Michał Iwanicki y Sébastien Hillaire. *Real Time Rendering*. Boca Raton, London y New York: CRC Press, 2018.

[Ama84] John Amanatides. "Ray tracing with cones". En: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 18.3 (1984), págs. 129-135.

[BD02] David Benson y Joel Davis. "Octree Textures". En: *ACM Transactions on Graphics* 21.3 (2002), págs. 785-790.

[Bli77] James F. Blinn. "Models of light reflection for computer synthesized pictures". En: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 11.2 (1977), págs. 192-198.

[CG12] Cyril Crassin y Simon Green. "Octree-Based Sparse Voxelization Using the GPU Hardware Rasterizer". En: *OpenGL Insights*. Ed. por Christophe Riccio Patrick Cozzi. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2012.

[Cra+09] Cyril Crassin, Fabrice Neyret, Sylvain Lefebvre y Elmar Eisemann. "GigaVoxels: Ray-Guided Streaming for Efficient and Detailed Voxel Rendering". En: *ACM Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. Boston, United States: ACM, 2009, págs. 15-22.

[Cra+11] Cyril Crassin, Fabrice Neyret, Miguel Sainz, Simon Green y Elmar Eisemann. "Interactive Indirect Illumination Using Voxel Cone Tracing". En: *Computer Graphics Forum* 30.7 (2011), págs. 1921-1930.

[DN04] Philippe Decaudin y Fabrice Neyret. "Rendering forest scenes in real-time". En: *Rendering Techniques (EGSR)*. 2004, págs. 93-102.

[Ern20] Emil Ernerfeldt. *Egui: an easy-to-use GUI in pure Rust*. https://github.com/emilk/egui. Última actualización: 8 de mayo 2023 (TODO: Actualizar). 2020.

[FSJ01] Ronald Fedkiw, Jos Stam y Henrik Wann Jensen. "Visual Simulation of Smoke". En: *SIGGRAPH* (2001).

[Gal21] Alain Galvan. *A Comparison of Modern Graphics APIs*. https://alain.xyz/blog/comparison-of-modern-graphics-apis. Accedido el 14 de diciembre 2023. 2021.

[HAO05] Jon Hasselgren, Tomas Akenine-Möller y Lennart Ohlsson. "Conservative Rasterization". English. En: *GPU Gems 2*. Addison-Wesley, 2005, págs. 677-690.

[Jen01] Henrik Wann Jensen. *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*. Wellesley, Massachusetts: AK Peters, 2001.

[Kaj86] James T. Kajiya. "The Rendering Equation". En: *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* 20.4 (1986), págs. 143-150.

[Khr23] Khronos. *The OpenGL Shading Language*. 4.6. Khronos Group. Ago. de 2023.

[Lou65] Rodney Loudon. *The Quantum Theory of Light*. 1965.

[Max73] James Clerk Maxwell. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Clarendon Press, 1873.

[MU12] Rosana Montes y Carlos Ureña. *An Overview of BRDF Models*. http://hdl.handle.net/10481/19751. Mar. de 2012.

[PJH23] Matt Pharr, Wenzel Jakob y Greg Humphreys. *Physically Based Rendering*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2023.

[SA19] Niklas Smal y Maksim Aizenshtein. "Real-Time Global Illumination with Photon Mapping". English. En: *Ray Tracing Gems*. Springer Science+Business Media, 2019, págs. 409-434.

[Ush22] Will Usher. *Tiny OBJ Loader in Rust*. https://github.com/Twinklebear/tobj/tree/3.2.2. Abr. de 2022.

[Wan+09] Rui Wang, Rui Wang, Kun Zhou, Minghao Pan y Hujun Bao. "An Efficient GPU-based Approach for Interactive Global Illumination". En: *ACM Transactions on Graphics* 28.91 (2009), págs. 1-8.

[WCH20] Zhihao Wang, Jian Chen y Steven C. H. Hoi. "Deep Learning for Image Super-Resolution: A Survey". En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 43.10 (2020).

[Whi80] Turner Whitted. "An improved illumination model for shaded display". En: *Communications of the ACM* 23.6 (1980), págs. 343-349.

Anexo: Manual de Usuario

En este anexo se presenta el manual de usuario del programa disponible en el siguiente repositorio de GitHub: https://github.com/franciscoaguirre/voxel-cone-tracing.

El repositorio incluye un ejecutable localizado en la carpeta *bin*, bajo el nombre *cli*. Cabe destacar que dicho ejecutable es compatible únicamente con sistemas operativos Linux. En caso de emplear un sistema operativo diferente, será necesario compilar el ejecutable a partir del código fuente proporcionado.

.0.1. Compilación del Código Fuente

Para compilar el código fuente, es indispensable tener instalado https://rustup.rs/. Una vez instalado, la compilación se realiza mediante la ejecución del siguiente comando:

```
cargo build --release
```

.1. Opciones de Ejecución

Si se ejecuta el programa sin especificar ninguna opción, este finalizará inmediatamente. Es necesario indicar qué escena se desea utilizar. En la carpeta *scenes* se encuentran varios archivos de escena con la extensión *.ron*. Para ejecutar una escena específica, debe añadirse la opción `--scene <nombre-escena>` al comando de ejecución, donde "<nombre-escena>" corresponde al nombre del archivo de la escena, sin incluir la extensión. Por ejemplo:

```
./cli --scene cornell-box
```

Además, el programa utiliza configuraciones definidas en el archivo *config.ron*, donde se pueden ajustar parámetros como la resolución de la ventana y la resolución de la grilla de vóxeles.

El repositorio también incluye archivos de *presets*, los cuales proporcionan un estado inicial para las escenas. Aunque se proporcionan algunos ejemplos

generados automáticamente, más adelante se detallará cómo generar nuevos.

.2. Controles del Programa

Una vez dentro del programa, con una escena cargada y sin un *preset* activado, se pueden utilizar las teclas *W*, *A*, *S*, *D* o las flechas del teclado para mover la cámara. A continuación, se describen algunas de las funcionalidades clave:

- Tecla *1*: Muestra la escena cargada.
- Tecla *2*: Muestra la versión voxelizada de la escena.
- Tecla *C*: Permite mover la fuente de luz, representada por un cubo blanco vacío. Los efectos de la luz se visualizarán cuando se activen opciones de iluminación directa o indirecta desde el menú.

.2.1. Acceso al Menú

El menú principal se accede mediante la tecla *Escape*, y proporciona acceso a varios submenús para el control detallado de diferentes aspectos del programa.

Como se observa en la Figura 1, los submenús disponibles son:

- All Nodes
- Node Search
- Bricks
- Children
- Diagnostics
- Images
- Photons
- Save Preset
- Camera
- Cone Tracing
- Picker

A continuación, se describen en detalle cada uno de estos.

All Nodes

Este submenú permite visualizar la representación gráfica del *octree* y ajustar el nivel de detalle mostrado. En la Figura 2 se muestra el botón que activa la visualización del *octree* y el *slider* que permite controlar los niveles.

Node Search

Este submenú ofrece la funcionalidad de buscar nodos del *octree* ya sea por índice o posición. Al seleccionar un nodo de la lista, este se muestra en el espacio de la escena. Además, existe la opción de destacar los nodos vecinos al nodo seleccionado, y es posible seleccionar múltiples nodos. Este menú ha sido de gran utilidad durante el proceso de depuración del programa. La Figura 3 ilustra su uso.

Bricks

Este submenú, a diferencia de los anteriores que muestran nodos, permite visualizar los bricks asociados a esos nodos. La Figura 4 muestra las distintas opciones disponibles. Para limitar el impacto en el rendimiento, es posible visualizar una capa de vóxeles de los bricks a la vez. Asimismo, se pueden visualizar el color y la irradiancia de los vóxeles, así como las normales de los mismos.

Los controles situados al final del submenú permiten cambiar la dirección desde la cual se observan los bricks, algo relevante dado que los vóxeles son filtrados anisotrópicamente.

Children

Al seleccionar un nodo utilizando el submenú *Node Search*, este submenú muestra los atributos del nodo seleccionado. La Figura 5 muestra este submenú con y sin un nodo seleccionado. Una vez seleccionado un nodo n, se presentan los índices de sus nodos hijos, los cuales pueden ser posteriormente buscados en el submenú *Node Search*.

Diagnostics

El submenú *Diagnostics* proporciona información sobre el rendimiento de la aplicación, específicamente los cuadros por segundo (FPS), como se muestra en la Figura 6.

Images

Este submenú permite mostrar diferentes imágenes en pantalla, de manera similar a cómo las teclas *1* y *2* permiten mostrar la escena original y la versión voxelizada respectivamente. En la Figura 7, se presentan las opciones disponibles:

- Color: Muestra la escena original, equivalente a presionar la tecla *1*.
- Direct Light: Muestra la escena iluminada únicamente por la luz directa.
- Indirect Diffuse: Muestra la escena iluminada por la luz indirecta difusa reflejada en las superficies.
- Indirect Specular: Muestra la escena iluminada por la luz indirecta especular reflejada en superficies brillantes o metálicas.
- Ambient Occlusion: Muestra la escena en escala de grises de acuerdo con la oclusión ambiental en cada punto.

Cada una de estas opciones añade un efecto adicional a la imagen, permitiendo una visualización progresiva de los diferentes elementos de la iluminación.

Photons

Este submenú, similar al submenú *Children*, muestra la cantidad de fotones en cada vóxel del brick de un nodo seleccionado previamente en el submenú *Node Search*.

Save Preset

Este submenú permite guardar todas las configuraciones seleccionadas en el menú en un archivo de *preset*. Para guardar, simplemente se debe elegir un nombre para el archivo y presionar el botón *Save*, como se muestra en la Figura 8. Estos archivos pueden ser cargados en futuras ejecuciones utilizando la opción `--preset <nombre-archivo>`.

Camera

Este submenú permite cambiar la proyección de la cámara a una vista ortogonal.

Cone Tracing

Este submenú ofrece control sobre la apertura y la distancia máxima de los conos utilizados para sombras, oclusión ambiental, reflexión difusa, reflexión especular y conos de prueba. La Figura 9 ilustra estas opciones.

Picker

Este submenú permite activar un modo en el cual el cursor puede ser utilizado para seleccionar un punto en la pantalla y lanzar un cono desde ese punto en la escena. El submenú se muestra en la Figura 10, y un ejemplo del cono de prueba en acción se presenta en la Figura 11. El cono de prueba muestra los nodos a través de los cuales pasa.

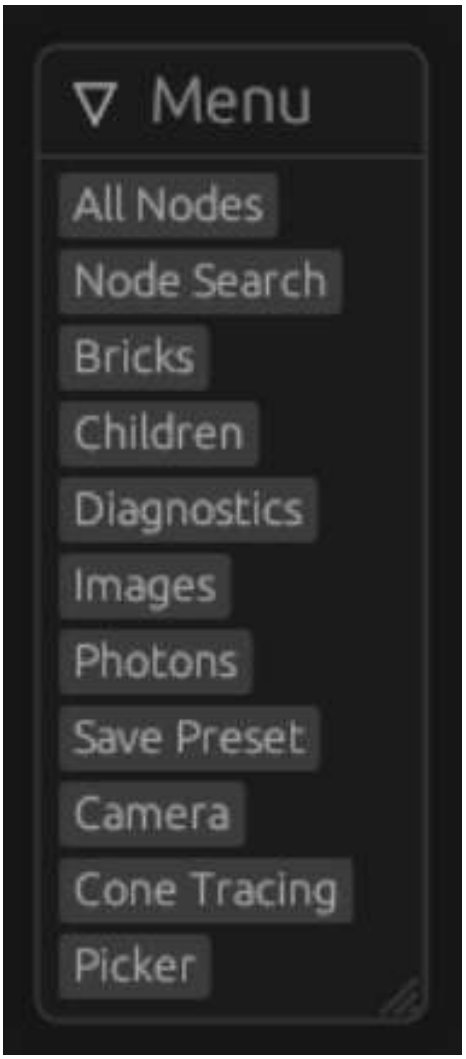


Figura 1: Menú Principal.

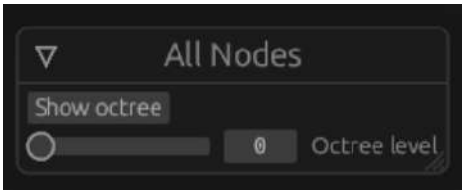


Figura 2: Submenú *All Nodes*.

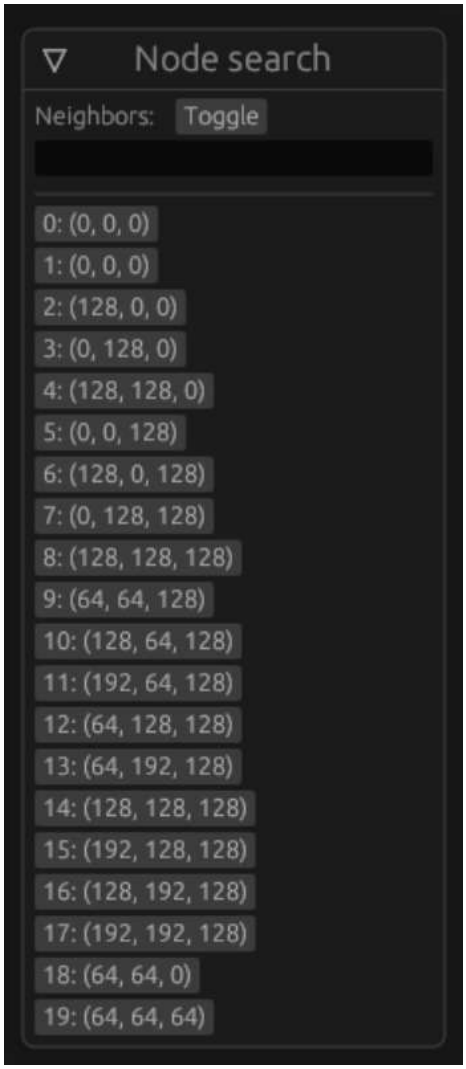


Figura 3: Submenú *Node Search*.

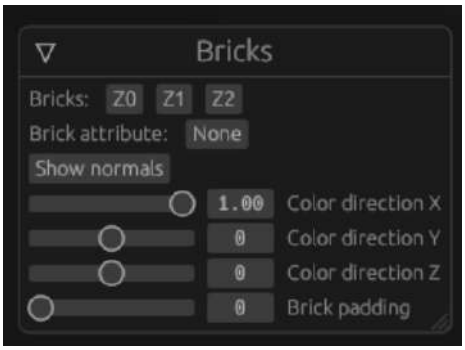


Figura 4: Submenú *Bricks*.

(a) Sin nodo seleccionado.

(b) Con nodo seleccionado.

Figura 5: Submenú *Children*.

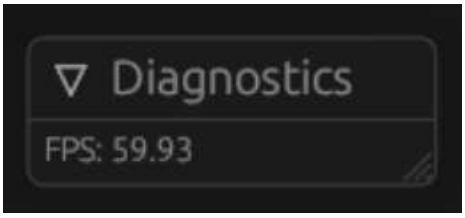


Figura 6: Submenú *Diagnostics*.

Figura 7: Submenú *Images*.

Figura 8: Submenú *Save Preset*.

Figura 9: Submenú *Cone Tracing*.

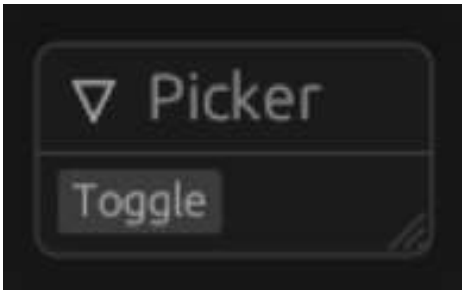


Figura 10: Submenú *Picker*.

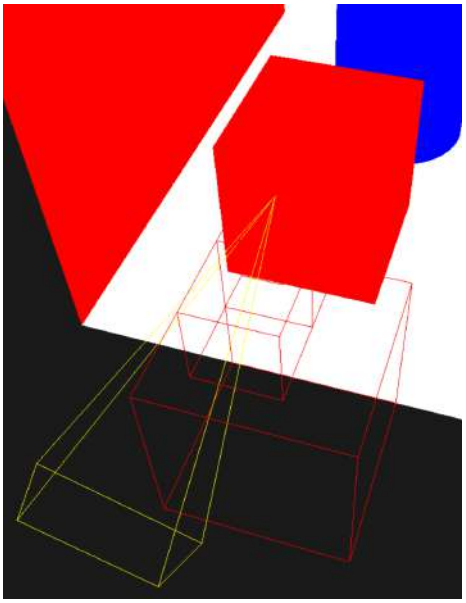


Figura 11: Cono de prueba en acción.